

Einfluss der Vakuum-Siede-Behandlung auf die anaerobe Verfügbarkeit ausgewählter Biomasseprodukte

Von der
Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines
Doktoringenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von
Tobias Bahr
geboren am 01.06.1975
aus Lübeck

Eingereicht am	23.12.2010
Disputation am	14.04.2011

Berichterstatter	Prof. Dr.-Ing. K. Fricke Prof.Dr.-Ing. habil. W.Bidlingmaier
------------------	---

(2011)

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde am Leichtweiß-Institut, Abteilung Abfall- und Ressourcenwirtschaft der Technischen Universität Braunschweig unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Klaus Fricke angefertigt. Ihm gilt mein besonderer Dank für die Aufgabenstellung, seine Gesprächsbereitschaft und das angenehme Arbeitsklima.

Meinen Kollegen und den am Gelingen dieser Arbeit beteiligten studentischen Hilfskräften, Studienarbeitern und Diplomanden möchte ich für ihr kollegiales Verhalten sowie den Studierenden (aktiven und ehemaligen) für Ihr Engagement herzlich danken. Dies gilt insbesondere für Herrn Timo Thiel, der mir über den größten Teil der Versuchsdurchführung und während der Abfassung der Arbeit hilfs- und gesprächsbereit zur Seite stand. Mein besonderer Dank gilt auch Herrn Dr.-Ing. Kai Münnich für viele interessante Anregungen und seine Diskussionsbereitschaft während der Niederschrift.

Für die Übernahme des Co-Referats danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Werner Bidlingmaier.

Herrn Prof Dr.-Ing. Norbert Dichtl und Herrn Prof. Dr. mont. Michael Nelles danke ich für Ihre Arbeit in der Prüfungskommission.

Der deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) bin ich für die Gewährung eines Promotionsstipendiums in den Jahren 2004 bis 2006 dankbar.

Für ihre Geduld, Ablenkung und liebevolle Unterstützung gilt mein Dank insbesondere meiner Frau Anika und meinen Söhnen Johannes und Thadeus, aber auch meiner Mutter, Manni, meinen Schwiegereltern und meinen langjährigen Freunden.

Ich widme diese Arbeit

Peter, Johannes und Thadeus Bahr

Braunschweig, April 2011

Tobias Bahr

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	xiii
1 Einleitung und Problemstellung	1
2 Rahmenbedingungen der Energiegewinnung aus organischen Abfällen und Biomassen	5
2.1 Aufkommen und Zusammensetzung relevanter organischer Rückstände und Biomassen in Deutschland	5
2.2 Politische und gesellschaftliche Ziele zur Biogasgewinnung und -nutzung	7
3 Grundlagen	13
3.1 Biochemische Grundlagen des anaeroben Abbaus organischer Substrate	13
3.1.1 Mikrobielle Grundlagen des anaeroben Abbaus	13
3.1.2 Stufen des anaeroben Abbaus	14
3.2 Zusammensetzung und Abbauverhalten organischer Substrate	19
3.2.1 Zusammensetzung organischer Substrate	19
3.2.2 Abbauverhalten organischer Substrate	23
3.2.3 Einfluss von Druckänderungen auf pflanzliche Zellen	26
3.3 Verfahrenstechnik der Vergärung	29
3.3.1 Prozessparameter und -bedingungen	31
3.3.2 Vergärungsverfahren	37
4 Vorbehandlungs- und Aufschlussverfahren	45
4.1 Einleitung	45
4.2 Biologische Verfahren	49

4.3	Chemische Verfahren	50
4.4	Physikalische Verfahren	51
4.4.1	Allgemeine Anmerkungen	51
4.4.2	Mechanische Verfahren	52
4.4.3	Temperaturbehandlungen	54
4.4.4	Druckbehandlung	58
4.4.5	Sonstige physikalische Verfahren	59
4.4.6	Die Vakuum-Siede-Behandlung	60
4.5	Ableitung des Forschungsbedarfs	63
4.5.1	Arbeitshypothesen	66
5	Material und Methoden	69
5.1	Allgemeine Anmerkungen	69
5.2	Großtechnische Versuche	69
5.2.1	Zielsetzung	69
5.2.2	Beschreibung der Versuchsanlage	70
5.2.3	Untersuchte Substrate	71
5.2.4	Versuchsdurchführung	72
5.2.5	Probennahme, -aufbereitung und -lagerung	75
5.2.6	Versuchsvarianten	75
5.3	Halbtechnische Versuche	77
5.3.1	Zielsetzung	77
5.3.2	Beschreibung der Versuchsanlage	77
5.3.3	Untersuchte Substrate	80
5.3.4	Versuchsdurchführung	81
5.3.5	Probennahme, -aufbereitung und -lagerung	83
5.3.6	Versuchsvarianten	84
5.3.7	Zusatzversuche mit Pressaten - Maissilage und Bioabfall . . .	85
5.4	Labortechnische Versuche	87
5.4.1	Zielsetzung	87
5.4.2	Vorversuche zur Vergärbarkeit des Versuchssubstrates der labortechnischen Versuche	87
5.4.3	Beschreibung des Versuchsaufbaus labortechnische Versuche .	89
5.4.4	Untersuchte Substrate	91
5.4.5	Versuchsdurchführung	94
5.4.6	Probennahme, -aufbereitung und -lagerung	96
5.4.7	Versuchsvarianten	96

5.5	Mess- und Analysemethoden	98
5.5.1	Probenlagerung	98
5.5.2	Standardanalysen und -parameter	98
5.5.3	Ergänzende Angaben zu Standardanalysen, zusätzliche Analysen und Parameter	99
5.5.4	Berechnungsmethoden	101
6	Versuchsergebnisse	107
6.1	Großtechnische Versuche	107
6.1.1	Allgemeine Angaben	107
6.1.2	Technische Funktionsfähigkeit	107
6.1.3	Extraktionsleistung	109
6.1.4	Potenzieller Energiegewinn und Energiebedarf	110
6.1.5	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	116
6.2	Halbtechnische Versuche	119
6.2.1	Allgemeine Angaben	119
6.2.2	Ausgangssubstrat Maissilage	119
6.2.3	Korrelation der Analysedaten der Pressate - Maissilage	120
6.2.4	Extraktionsleistung der Versuchsvarianten - Maissilage	121
6.2.5	Auswirkung des Pressaggregats auf die Extraktionsleistung - Maissilage	123
6.2.6	Auswirkung der Prozesswassermasse auf die Extraktionsleistung - Maissilage	127
6.2.7	Auswirkung der Intensität der Vakuum-Siede-Behandlung auf die Extraktionsleistung - Maissilage	129
6.2.8	Auswirkung der Intensität der Maisch-Behandlung auf die Ex- traktionsleistung - Maissilage	131
6.2.9	Auswirkung der Intensität der Vakuum-Siede-Behandlung und Maischbehandlung auf die Extraktionsleistung - Maissilage . .	134
6.2.10	Varianzanalysen ausgewählter Versuchsergebnisse - Maissilage	138
6.2.11	Energieverbrauch - Maissilage	139
6.2.12	Ausgangssubstrat - Bioabfall	141
6.2.13	Extraktionsleistung der Versuchsvarianten - Bioabfall	142
6.2.14	Zusatzversuche mit Pressaten - Maissilage und Bioabfall . . .	143
6.2.15	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	146
6.3	Versuchsergebnisse labortechnische Versuche	149

6.3.1	Allgemeine Angaben	149
6.3.2	Ausgangssubstrate	149
6.3.3	Vorversuche	153
6.3.4	Gasbildungsraten	155
6.3.5	Organischer Abbau - zusätzliche Summenparameter	160
6.3.6	Eluierversuche	161
6.3.7	Varianzanalysen der Versuchsergebnisse	162
6.3.8	Korrelation der Messdaten	165
6.3.9	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	166
7	Diskussion und Schlussfolgerungen	169
7.1	Die Vakuum-Siede-Behandlung als Bestandteil anaerober Verfahren	169
7.2	Versuchsergebnisse	170
7.2.1	Erfahrungen mit einer großtechnischen Pilotanlage	170
7.2.2	Ergebnisse der halb- und labortechnischen Versuche	170
7.3	Entwicklung grundsätzlicher Modellvorstellungen	171
7.3.1	Modellvorstellung zur auf die pflanzliche Zellwand wirkenden Kraft aufgrund eines Druckes	173
7.3.2	Modellvorstellung zur Einwirkung der inneren Energie einer Druck- und Unterdruckbehandlung	174
7.3.3	Modellvorstellung zur Auswirkung eines Dampfexplosionsverfahrens	179
7.4	Schlussfolgerungen und Ausblick	182
	Literaturverzeichnis	185
A	Großtechnische Versuche	211
A.1	Massenbilanzen	211
B	Halbtechnische Versuche	215
B.1	Ausgangssubstrate	216
B.1.1	Ausgangssubstrat - Maissilage	216
B.1.2	Ausgangssubstrat - Bioabfall	217
B.2	Versuchsergebnisse	218
B.2.1	Versuchsergebniss - Maissilage	218
B.2.2	Versuchsergebnisse - Bioabfall	222
B.2.3	Extraktionsergebnisse - Maissilage	224

B.2.4	Extraktionsergebnisse - Bioabfall	225
B.2.5	Auswirkungen der einzelnen Prozessparameter - Maissilage . .	225
B.2.6	Auswirkungen der Prozessparameter - Bioabfall	231
B.2.7	Zusatzversuche	233
B.2.8	Energieverbrauch - Maissilage	236
C	Labortechnische Versuche	237
C.1	Vorversuche	237
C.2	Summenparameter der Inputanalysen	237
C.3	Gasbildungsversuche	244
C.4	Organischer Abbau - Summenparameter und Outputwerte	250
C.5	Eluierversuche	253
	Anhang	211

Abbildungsverzeichnis

2.1	Biogasanlagenentwicklung in Deutschland	11
3.1	Schema des mehrstufigen anaeroben Abbaus	15
3.2	Vereinfachte Übersicht der wichtigsten Prozesse des anaeroben Abbaus	18
3.3	Abbaubarkeit organischer Stoffe	20
3.4	Mikroskopischer Aufbau der pflanzlichen Zellwand	24
3.5	Allgemeiner Verfahrensablauf bei der Biogasgewinnung	30
3.6	Einflussparameter auf den anaeroben Abbauprozess	32
3.7	Dissoziationsgleichgewichte von $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{H}_2\text{S}/\text{HS}$ und Fettsäuren sowie dadurch hervorgerufene Hemmungen	34
3.8	Einteilung der Vergärungsverfahren nach deren Prozessführung . . .	37
4.1	Schematische Einbindung der Vakuum-Siede-Extraktion in ein Ge- samtverfahren	60
4.2	Grundschema des ursprünglich projektierten Verfahrensablaufs der Vakuum-Siede-Extraktion	62
5.1	Schematische Darstellung der großtechnischen Anlage zur Vakuum- Siede-Extraktion und -Trocknung	70
5.2	Großtechnische Versuchsanlage: Vakuum-Siede-Reaktor und Innenraum des Reaktors mit Schneckenförderer	71
5.3	Versuchsdurchführung großtechnische Versuche	74
5.4	Schematische Darstellung der Mess- und Probennahmestellen - groß- technische Anlage	75
5.5	Schematische Darstellung der halbtechnischen Versuchsanlage, Kom- ponenten und Messeinrichtungen	78
5.6	Halbtechnischen Versuchsanlage	79
5.7	Massenfluss der eingesetzten Substrate durch die Komponenten der Versuchsanlage	79

5.8	Schematische Darstellung der verwendeten Schneckenpresse	80
5.9	Versuchsdurchführung halbtechnische Versuche	82
5.10	Versuchsaufbau der Zusatzversuche zum anaeroben Abbau der Pressate, halbtechnische Versuche	86
5.11	Versuchsaufbau der Vorversuche, labortechnische Versuche	88
5.12	Schematischer Versuchsaufbau Vakuum-Siede-Behandlung, labortechnische Versuche	89
5.13	Schematischer Versuchsaufbau Gärversuche, labortechnische Versuche	90
5.14	Aufbereitete Einzelkomponenten der Modellsubstrate	91
5.15	Versuchsdurchführung labortechnische Versuche	94
6.1	CSB-Konzentrationen und -Frachten der großtechnischen Versuche .	110
6.2	Energieverbrauch der großtechnischen Versuche	112
6.3	Lineare Regression zwischen oTS- und CSB-Gehalt sowie GB ₁₀ und CSB-Fracht der Pressate - Maissilage	121
6.4	Anteilige Extraktion organischer Inhaltsstoffe aus den Ausgangssubstraten in das Pressat - Maissilage	122
6.5	Einfluss des Pressaggregats auf die Pressatausbeute und den TS-Gehalt des Pressrückstandes	124
6.6	Einfluss des Pressaggregats auf den TS- und oTS-Gehalt des Pressats	124
6.7	Einfluss des Pressaggregats auf den CSB-Gehalt und die CSB-Fracht des Pressats	125
6.8	Einfluss des Pressaggregats auf die Gasausbeute aus dem Pressat . .	126
6.9	Einfluss der Prozesswassermasse auf die Pressatausbeute und den TS-Gehalt des Pressrückstandes	128
6.10	Einfluss der Prozesswassermasse auf den CSB-Gehalt und die CSB-Fracht des Pressats	128
6.11	Einfluss der Intensität der Vakuum-Siede-Behandlung auf die Pressatausbeute und den TS-Gehalt des Pressrückstandes	130
6.12	Einfluss der Vakuum-Siede-Behandlung auf den CSB-Gehalt und die CSB-Fracht des Pressats	131
6.13	Einfluss der Vakuum-Siede-Behandlung auf die Gasausbeute aus dem Pressat	131
6.14	Einfluss der Intensität der Maisch-Behandlung auf den CSB-Gehalt und die CSB-Fracht des Pressats	133

6.15 Einfluss der Intensität der Vakuum-Siede- und Maisch-Behandlung auf die Pressatausbeute und den TS-Gehalt des Pressrückstandes - Wasser/Silage: 1/1	135
6.16 Einfluss der Intensität der Vakuum-Siede- und Maisch-Behandlung auf den TS- und oTS-Gehalt des Pressats - Wasser/Silage: 1/1	136
6.17 Einfluss der Intensität der Vakuum-Siede- und Maisch-Behandlung auf den CSB-Gehalt und die CSB-Fracht des Pressats - Wasser/Silage: 1/1	137
6.18 Einfluss der Intensität der Vakuum-Siede- und Maisch-Behandlung auf die Gasausbeute aus dem Pressat - Wasser/Silage: 1/1	137
6.19 Energieverbrauch der Versuchsvarianten Sc5090/90 und Sc5090/00 .	140
6.20 Anteilige Extraktion organischer Inhaltsstoffe aus dem Ausgangssubstrat in das Pressat - Bioabfall	142
6.21 Absetzversuch und Stärkenachweis von Maissilagepressaten	144
6.22 CSB-Konzentrationen der Silage-Pressate nach unterschiedlich intensiver Vorbehandlung - filtriert und unfiltriert	144
6.23 Gasbildungsaktivität der unfiltrierten Silage-Pressate nach unterschiedlich intensiver Vorbehandlung (Wasser/Silage: 1/1)	145
6.24 Biochemische Zusammensetzung der Ausgangssubstrate	150
6.25 Zusammensetzung der Eingangssubstrate, Mittelwerte aller Versuchsansätze der Versuchsreihen	151
6.26 Summenkurven der Biogasbildung - Mischsubstrate und Bioabfall, Vorversuche	154
6.27 Gasbildungsbeträge der Versuchsvarianten	155
6.28 Summenkurven der Biogasbildung, Versuchsreihe V.1	156
6.29 Summenkurven der Biogasbildung, Versuchsreihe V.2	157
6.30 Summenkurven der Biogasbildung, Versuchsreihe V.3	157
6.31 Summenkurven der Biogasbildung, Versuchsreihe V.5	158
6.32 Summenkurven der Biogasbildung, Versuchsreihe V.6	158
6.33 Verlauf der Gaskonzentrationen, Versuchsreihe V.1	159
6.34 oTS-, TOC- und CSB-Abbau der Versuchsvarianten	161
6.35 Eluierbarkeit der CSB- und TOC-Fracht der Versuchsvarianten . . .	162
6.36 Korrelation der Messdaten analysierter Parameter	166
7.1 Modellvorstellung der Krafteinwirkung auf die Zellwand durch Druck	173
7.2 Modellvorstellung zur Brownschen Molekularbewegung	174
7.3 Modellvorstellung zur Auswirkung der inneren Energie auf die Zelldesintegration	179

7.4	Modellvorstellung zur Auswirkung eines Dampfexplosionsverfahrens auf die Zelldesintegration	180
A.1	Massenbilanz HM5080-2 Sankey-Darstellung	211
A.2	Massenbilanz MB-SI5070 Sankey-Darstellung	212
A.3	Massenbilanz HM5080-3 Sankey-Darstellung	213
A.4	Massenbilanz HM10080 Sankey-Darstellung	214
B.1	Einfluss der Prozesswassermasse auf den TS- und oTS-Gehalt des Pressats	225
B.2	Einfluss der Prozesswassermasse auf die Gasausbeute aus dem Pressat	226
B.3	Einfluss der Vakuum-Siede-Behandlung auf den TS- und oTS-Gehalt des Pressats	226
B.4	Einfluss der Intensität der Maisch-Behandlung auf die Pressatausbeute und den TS-Gehalt des Pressrückstandes	227
B.5	Einfluss der Intensität der Maisch-Behandlung auf den TS- und oTS-Gehalt des Pressats	227
B.6	Einfluss der Intensität der Maisch-Behandlung auf die Gasausbeute aus dem Pressat	228
B.7	Einfluss der Intensität der Vakuum-Siede- und Maisch-Behandlung auf die Pressatausbeute und den TS-Gehalt des Pressrückstandes - Wasser/Silage: 2/1	228
B.8	Einfluss der Intensität der Vakuum-Siede- und Maisch-Behandlung auf den TS- und oTS-Gehalt des Pressats - Wasser/Silage: 2/1	229
B.9	Einfluss der Intensität der Vakuum-Siede- und Maisch-Behandlung auf den CSB-Gehalt und die CSB-Fracht des Pressats - Wasser/Silage: 2/1	229
B.10	Einfluss der Intensität der Vakuum-Siede- und Maisch-Behandlung auf die Gasausbeute aus dem Pressat - Wasser/Silage: 2/1	230
B.11	Einfluss des Behandlungsverfahrens auf die Pressatausbeute und den TS-Gehalt des Pressrückstandes	231
B.12	Einfluss des Behandlungsverfahrens auf den TS- und oTS-Gehalt des Pressats	231
B.13	Einfluss des Behandlungsverfahrens auf den CSB-Gehalt und die CSB-Fracht des Pressats	232
B.14	Einfluss des Behandlungsverfahrens auf die Gasausbeute aus dem Pressat	232

B.15 Gasbildungsaktivität der filtrierten Silage-Pressate nach unterschiedlich intensiver Vorbehandlung (Wasser/Silage: 1/1)	233
B.16 Gasbildungsaktivität der unfiltrierten Silage-Pressate nach unterschiedlich intensiver Vorbehandlung (Wasser/Silage: 2/1)	233
B.17 CSB-Konzentrationen der Bioabfall-Pressate nach unterschiedlich intensiver Vorbehandlung - filtriert und unfiltriert	234
B.18 Gasbildungsaktivität der unfiltrierten Bioabfall-Pressate nach unterschiedlich intensiver Vorbehandlung	234
B.19 Gasbildungsaktivität der filtrierten Bioabfall-Pressate nach unterschiedlich intensiver Vorbehandlung	235
B.20 Energieverbrauch der Versuchsvarianten Sc5090/90-2, Sc5040/90 und Sc5040/50-2	236
C.1 Verlauf des pH-Wertes der Versuchswiederholungen über die Dauer der Gärversuche	237
C.2 Summenkurven der Biogasbildung, Versuchsreihe V.1	245
C.3 Summenkurven der Biogasbildung, Versuchsreihe V.2	245
C.4 Summenkurven der Biogasbildung, Versuchsreihe V.3	246
C.5 Summenkurven der Biogasbildung, Versuchsreihe V.5	246
C.6 Summenkurven der Biogasbildung, Versuchsreihe V.6	247
C.7 Verlauf der Gaskonzentrationen, Versuchsreihe V.2	247
C.8 Verlauf der Gaskonzentrationen, Versuchsreihe V.3	248
C.9 Verlauf der Gaskonzentrationen, Versuchsreihe V.5	248
C.10 Verlauf der Gaskonzentrationen, Versuchsreihe V.6	249

Tabellenverzeichnis

2.1	Technische Potenziale verschiedener Biomassen in Deutschland . . .	7
2.2	Beitrag des Biogases zur Energiebereitstellung in Deutschland	10
3.1	Zusammensetzung pflanzlicher und tierischer Biomasse	22
3.2	Spezifische theoretische Biogaserträge und Methangehalte	23
3.3	Cellulose-, Hemicellulose- und Ligninanteil verschiedener Abfallkomponenten	25
3.4	Hemmende und toxische Einflussgrößen auf den anaeroben Abbau . .	36
3.5	Rückhalt und Rückführung von Biomasse	38
3.6	Milieuoptima bei Hydrolyse und Acidogenese sowie Acetogenese und Methanogenese	40
4.1	Desintegrationsverfahren für Abfälle und Schlämme	48
5.1	Messungen, Probennahmen und Analysen, großtechnische Versuche .	73
5.2	Versuchsvarianten großtechnische Versuche	76
5.3	Messungen, Probennahmen und Analysen, halbtechnische Versuche .	83
5.4	Versuchsvarianten halbtechnische Versuche - Maissilage	84
5.5	Versuchsvarianten halbtechnische Versuche - Bioabfall	85
5.6	Messungen, Probennahmen und Analysen, Vorversuche - labortechnische Versuche	88
5.7	Versuchssubstrate - labortechnische Versuche	92
5.8	Beispielhafte Substratmischung - labortechnische Versuche	93
5.9	Messungen, Probennahmen und Analysen, labortechnische Versuche	96
5.10	Versuchsvarianten, labortechnische Versuche	97
5.11	Verwendete Analysemethoden für Feststoffe und Flüssigkeiten	99
6.1	Probleme, Störungen und Lösungsansätze großtechnische Versuchsanlage	108

6.2	CSB-Konzentrationen und Frachten sowie zu erwartender Biogas-, Methan- und Energiegewinn	111
6.3	Energieverbrauch der großtechnischen Versuche	112
6.4	Approximative Massen- und Energiebilanz für eine optimierte großtechnische Anlage	115
6.5	Konzentrationen und Gasbildungsraten der Input-Substrat-Chargen - Maissilage	120
6.6	Versuchsvarianten zur Bestimmung des Einflusses des Pressaggregates - Maissilage	123
6.7	Versuchsvarianten zur Bestimmung des Einflusses der Prozesswassermasse - Maissilage	127
6.8	Versuchsvarianten zur Bestimmung des Einflusses der Intensität der Vakuum-Siede-Behandlung - Maissilage	129
6.9	Versuchsvarianten zur Bestimmung des Einflusses der Intensität der Maisch-Behandlung - Maissilage	132
6.10	Versuchsvarianten zur Bestimmung des Einflusses der Intensität der Vakuum-Siede- und Maisch-Behandlung - Maissilage	134
6.11	Werte der Testgröße F der einfaktoriellen ANOVA - CSB-Werte, ausgewählter Varianten	138
6.12	Konzentrationen und Gasbildungsraten der Input-Substrat-Chargen - Bioabfälle	141
6.13	Wertebereiche der Summenparameter der Versuchssubstrate	150
6.14	Charakterisierung der Modellsubstrate hinsichtlich der Vergärbarkeit	152
6.15	Quotienten und Gehalte des Kohlenhydrat-Lignin-Komplexes der untersuchten Substrate	152
6.16	Werte der Testgröße F der einfaktoriellen ANOVA - unbehandelt vs. vakuum-siede-behandelt	163
6.17	Werte der Testgröße F der einfaktoriellen ANOVA - wärmebehandelt vs. vakuum-siede-behandelt	164
6.18	Werte der Testgröße F der einfaktoriellen ANOVA - Eluierversuche	165
B.1	Frachtangaben zu den im Inputmaterial analysierten Parametern - Maissilage	216
B.2	Frachtangaben zu den im Inputmaterial analysierten Parametern - Bioabfälle	217
B.3	Outputmasse nach Behandlung und Pressatmassen nach Fest-Flüssig-Trennung - Maissilage	218

B.4	TS-, oTS- und CSB-Konzentrationen sowie spezifische Gasbildung der Pressate - Maissilage	219
B.5	TS-, oTS- und CSB-Frachten sowie Gasbildung der Pressate - Maissilage	220
B.6	TS- und oTS-Konzentrationen der Pressrückstände - Maissilage	221
B.7	Outputmasse nach Behandlung und Pressatmassen nach Fest-Flüssig-Trennung - Bioabfall	222
B.8	TS-, oTS- und CSB-Konzentrationen sowie spezifische Gasbildung der Pressate - Bioabfall	222
B.9	TS-, oTS- und CSB-Frachten sowie Gasbildung der Pressate - Maissilage	223
B.10	Anteilige Extraktion organischer Inhaltsstoffe aus den Ausgangssubstraten in das Pressat - Maissilage	224
B.11	Anteilige Extraktion organischer Inhaltsstoffe aus den Ausgangssubstraten in das Pressat - Bioabfall	225
B.12	CSB-Konzentrationen der Pressate aus den Zusatzuntersuchungen - unfiltriert und filtriert	235
C.1	TS- und oTS-Gehalte der verwendeten Substrate und Inokula aller Versuchsreihen - labortechnische Versuche	238
C.2	TOC-Gehalte der verwendeten Substrate und Inokula aller Versuchsreihen - labortechnische Versuche	239
C.3	CSB-Gehalte der verwendeten Substrate und Inokula aller Versuchsreihen - labortechnische Versuche	240
C.4	Rohnährstoffgehalt der Einzelkomponenten der Eingangssubstrate	241
C.5	Hemicellulose-, Cellulose- und Lignin-Gehalt der Einzelkomponenten der Eingangssubstrate	241
C.6	Substrateinwaagen der Versuchsvarianten: Frischsubstanz, Trockensubstanz und organische Trockensubstanz	242
C.7	TOC- und CSB-Konzentrationen sowie TOC- und CSB-Frachten der Versuchsvarianten	243
C.8	Gasbildung der Versuchsvarianten	244
C.9	oTS-, TOC- und CSB-Abbau der Versuchsvarianten - Mittelwerte und Standardabweichungen	250
C.10	FS-, TS- und oTS-Frachten nach Vergärungsversuchen	251
C.11	TOC- und CSB-Konzentrationen und -Frachten nach Vergärungsversuchen	252

C.12 Eingangssubstrat Eluierversuche - FS-, TS- und oTS-Massen	253
C.13 CSB-Frachten Eluierversuche und Eluierbarkeit	254
C.14 TOC-Frachten Eluierversuche und Eluierbarkeit	255

Abkürzungsverzeichnis

ϵ	Elastizitätsmodul
a	Jahr
AbfAbIV	Abfallablagerungsverordnung
ADF	Acid Detergent Fiber
ADL	Acid-Detergent-Lignin
ADS _{org}	Acid Detergent. organische Substanz
ATP	Adenosintriphosphat
BHKW	Blockheizkraftwerk
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
C	Kohlenstoff
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
ebd.	ebenda; siehe vorherige Quellenangabe
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
el	elektrisch
FM	Frischmasse
FOS	Flüchtige organische Säuren
FS	Frischsubstrat
GB _x	Gasbildungsrate in x Tagen
GC	Gaschromatograph
hPa	Hektopascal
K	Temperatur in Kelvin
kWh	Kilowattstunden
mbar	Millibar
Mg	Megagramm
NaWaRo	Nachwachsende Rohstoffe
NDF	Neutral Detergent Fiber
Nl	Liter unter Normalbedingungen
Nm ³	Normkubikmeter

oTR	organischer Trockenrückstand
oTS	organische Trockensubstanz
P	Druck
PJ	Petajoule
RASH	Rapid-Steam-Hydrolysis/Continuous Extraction
STABW	Standardabweichung
TA-Luft	Technische Anleitung Luft
TAC	Total anorganic carbon
TOC	Total organic carbon
TS	Trockensubstanz
TW	Terrawatt
TWh	Terrawatt-Stunden
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
V	Volumen
vgl.	vergleiche
vs.	versus
VSb	Vakuum-Siede-Behandlung
VSE	Vakuum-Siede-Extraktion
VST	Vakuum-Siede-Trocknung
XL	Rohfett
XP	Rohprotein

Kapitel 1

Einleitung und Problemstellung

Globale Entwicklungen beeinflussen die Rohstoffmärkte insbesondere im Energiesektor. Bedarfssteigerungen und Ressourcenverknappung bewirken massiv steigende Rohstoff- und Sekundärrohstoffpreise. Im Zusammenhang mit dem Klimaschutz gewinnen regenerative Energieträger, wie die Biomasse, eine herausragende Bedeutung. Die Energiegewinnung aus Biomasse mit Hilfe von Anaerobtechnologien bildet für die zukünftige Energiebereitstellung einen wichtigen Baustein. Techniken zur anaeroben Behandlung organischer Stoffe sind seit langem in den Bereichen der Abwasserreinigung, der Verwertung landwirtschaftlicher Reststoffe (Gülle und zunehmend Biomassen) sowie der Abfallwirtschaft im Einsatz. So waren in Deutschland Ende 2008 über 4.100 Vergärungsanlagen in Betrieb [Thrän et al., 2009]. 2007 wurden in insgesamt 698 Anlage (39 % des Anlagenbestandes der biologischen Reststoff- und Abfallbehandlungsanlagen) ca. 3,9 Mio. Mg (29,5 %) der gesamten Abfälle zur biologischen Behandlung verarbeitet [DESTATIS, 2009].

In der Abfallwirtschaft gewinnt die Vergärung von Bioabfällen zunehmend an Bedeutung, da hier zum einen ein sehr großes Potenzial an noch zur erschließenden Mengen von ca. 2 Mio. Mg/a zu verzeichnen ist [Fricke et al., 2010]. Zum anderen wird die überwiegende Mehrheit der gesammelten Bioabfälle nach wie vor in Kompostierungsanlagen (ca. 880 Anlagen) verarbeitet [Kehres, 2007]. Lediglich in etwa 85 Anlagen werden kommunale, getrennt gesammelte Bioabfälle verwertet [Scholwin und Nelles, 2009]. Unterstützt durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) ist zurzeit ein massiver Zuwachs an Vergärungstechnologien zur Verarbeitung von Bioabfällen zu verzeichnen.

Ökologisch und ökonomisch wirksam sind Vergärungsverfahren aber nur bei ausreichend hohem energetischen Wirkungsgrad, der bestimmt wird durch die spezifische Energieproduktion und den spezifischen Eigenenergiebedarf der Vergärungsanlage.

Die Energieproduktion ist von vielfältigen, zum Teil in Wechselwirkung stehenden Faktoren, beeinflusst. Herauszuheben sind:

- der anaerobe Abbauprozess,
- die mikrobielle Verfügbarkeit der für die Vergärung vorgesehenen Substrate,
- die Art der Nutzung des erzeugten Biogases und
- die funktionelle Verfügbarkeit der Gesamtanlage.

Kann aufgrund der oben genannten langjährigen Entwicklung in unterschiedlichen Anwendungsfällen dem Vergärungsprozess ein hoher Entwicklungsstand attestiert werden, so trifft dies nicht in gleichem Maße für die Aufbereitungsverfahren vor der Vergärung zu, die dazu geeignet sind, die mikrobielle Verfügbarkeit der für die Vergärung vorgesehenen Substrate zu steigern – dies gilt insbesondere für feste Biomassesubstrate.

Die in der Praxis üblicherweise angewandten Verfahren zur Aufbereitung fester organischer Abfallstoffe (Bio- und Restabfall) vor der Vergärung beschränken sich hauptsächlich auf eine Kombinationen aus Zerkleinerung und Siebung. Ziel dieser Aufbereitungsschritte ist es, nicht vergärbare Substratkomponenten auszuschleusen und den für die Vergärung vorgesehenen Stoffstrom „transport und maschinengängig“ zu konditionieren.

Durchschnittlich werden bei der Vergärung von Bioabfällen, bezogen auf den Fermenterinput, lediglich 40 bis 50 % der biologisch abbaubaren organischen Substanz anaerob abgebaut [Fricke et al., 2007a; Vollmer, 2001; Amon und Döhler, 2006; Weiland, 2001a]. Ein Grund für die geringen Abbauleistungen liegt in der im Vergleich zur aeroben Behandlung geringeren anaeroben Verfügbarkeit der organischen Substrate [Edelmann, 2001; Radke, 2000].

Zur Erhöhung der Verfügbarkeit können eine Vielzahl physikalischer, biologischer und chemischer Verfahren eingesetzt werden, die über die oben genannte gängige Praxis hinausgehen. Diese konnten sich aufgrund hoher Betriebskosten, hohen apparativen Aufwands oder anderer adverser Effekte nur wenige in der Praxis etablieren und sind in der Regel energie- und kostenaufwendig.

Durch geeignete Optimierungsschritte in diesen Verfahrenssegmenten kann die Energieeffizienz der Vergärungstechnologie gesteigert, ihr Marktwert erhöht und dessen Bedeutung als integriertes Verfahren zur stofflichen und energetischen Nutzung verschiedener Biomassen verbessert werden. In der Vergangenheit hat es unterschiedliche Ansätze gegeben, die Energieeffizienz von Vergärungsverfahren positiv zu beeinflussen. Eine Reihe von Verfahren hatte dabei auch die Erhöhung der anaeroben

biologischen Verfügbarkeit durch Aufschluss- und Konditionierungsverfahren zum Ziel.

Hier knüpft die vorliegende Arbeit an. Ziel des Forschungs- und Entwicklungsansatzes ist es, die Vakuum-Siede-Behandlung bzw. -Extraktion – ein neuartiges Aufschluss- und Extraktionsverfahren – zu entwickeln und hinsichtlich seiner Eignung und Leistungsfähigkeit als Verfahrensschritt zur Erhöhung der anaeroben Verfügbarkeit und damit der Verbesserung des Biogasertrages zu untersuchen. Als Arbeitshypothese gilt, dass durch die Vakuum-Behandlung unter erwärmten Bedingungen, Zellstrukturen zerstört und die effektiven Oberflächen organischer Substrate vergrößert werden. Das so konditionierte Substrat bzw. die hieraus in erhöhtem Umfang in eine Flüssigphase überführbare Organik liegt für einen nachgeschalteten Anaerobprozess besser verfügbar vor. Somit kristallisieren sich zwei Kernfragestellungen heraus: Welchen Einfluss übt die Vakuum-Siede-Behandlung auf die anaerobe Verfügbarkeit unterschiedlicher fester Biomassesubstrate aus und welche zusätzlichen Gaserträge können dadurch erreicht werden?

Flankierend soll mit diesem Verfahrenskonzept darüber hinaus – bei nachgewiesener Wirksamkeit der Vakuum-Siede-Behandlung – eine weitere Nutzungsoption für die auf vielen Standorten von Vergärungsanlagen zur Verfügung stehende Überschusswärme bereitgestellt werden.

Kapitel 2

Rahmenbedingungen der Energiegewinnung aus organischen Abfällen und Biomassen

2.1 Aufkommen und Zusammensetzung relevanter organischer Rückstände und Biomassen in Deutschland

Das Angebot an Biomassen ist vielfältig und umfasst die unterschiedlichsten Stoffe. Grundsätzlich können im Hinblick auf eine energetische Nutzung nach Ramesohl und Arnold [2006] organische Rückstände und Energiepflanzen unterschieden werden.

Rückstände, Nebenprodukte und Abfälle umfassen bereits vorhandene Stoffe bzw. Stoffströme, die einer energetischen Verwertung oder stofflichen Nutzung zugeführt werden. Dieses können beispielsweise organische Abfälle aus Haushalten, Industrie und Gewerbe sowie land- und forstwirtschaftliche Rückstände sein. Die verfügbaren Mengen werden durch die industrielle Produktion, die Entwicklung der Land- und Forstwirtschaft bzw. durch abfallwirtschaftliche Prozesse und Maßnahmen beeinflusst.

Energiepflanzen bzw. nachwachsende Rohstoffe (NaWaRo) werden im Gegensatz hierzu direkt für die energetische Nutzung auf landwirtschaftlichen Flächen angebaut. Neben wirtschaftlichen Faktoren, wie energetischen Aufwendungen für Anbau, Bewirtschaftung und Ernte, ist die Verfügbarkeit im Wesentlichen durch das Flächenangebot und die erreichbaren Ernteerträge limitiert. Die Konkurrenz zu anderen Flächennutzungen (z.B. Nahrungsmittelproduktion) ist ebenfalls zu berücksichtigen.

Die mengenmäßige Entwicklung des Biomassepotenzials hängt hauptsächlich von der Entwicklung des Energiepflanzenanbaus ab, da die Mengen der in Frage kommenden landwirtschaftlichen, kommunalen und industriellen Reststoffe weitgehend stagnieren [Ramesohl und Arnold, 2006].

In der Tabelle 2.1 sind die technisch nutzbaren Potenziale an Biomasse für Deutschland aufgeführt. Das maximal biochemisch nutzbare Potenzial (Vergärung zu Biogas) liegt demnach bei 72,2 Mrd. kWh/a (260 PJ/a). Die Landwirtschaft hat hieran mit Beiträgen aus NaWaRo, Ernterückständen, Exkrementen und Grasschnitt aus Dauergrünland den weitaus größten Anteil mit 61 Mrd. kWh/a (84 %). Das technische Potenzial aus industriellen Reststoffen beträgt 3,5 Mrd. kWh/a (5 %), während aus kommunalen Reststoffen ein technisches Potenzial von 7,7 Mrd. kWh/a (11 %) zur Verfügung steht. Zu letzterem zählen neben den organischen Siedlungsabfällen auch das Landschaftspflegematerial. Aufgrund wirtschaftlicher und logistischer Hemmnisse (Transportentfernung, Größe landwirtschaftlicher Betriebe etc.), gehen Ramesohl und Arnold [2006] nach einer substratspezifischen Abschätzung davon aus, dass für eine Einspeisung in ein Gasnetz knapp 53 Mrd. kWh/a als realistisch einzustufen sind. Für eine weitere Entwicklung bis 2030 prognostizieren die Autoren ein maximales Gesamtpotenzial von 78 bis knapp 105 Mrd. kWh/a, das für eine Aufbereitung und Einspeisung zu Verfügung stehen könnte.

Das aktuelle Leitszenario des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) geht bis zum Jahr 2030 von einem Anstieg der durch Bio-, Deponie und Klärgas bereitgestellten Energieerzeugung von 50,5 Mrd. kWh/a aus (26,2 kWh/a elektrisch, 24,3 kWh/a thermisch). Die hier ebenfalls enthaltene Prognose bis 2050 enthält keine weiteren nennenswerten Anstiege [Niltch und Wenzel, 2009]. Das Branchenszenario des Bundesverbandes Erneuerbarer Energie e.V. geht bereits für das Jahr 2020 von einer Stromproduktion aus Biogas (inkl. Deponie- und Klärgas) von 33,3 kWh/a aus. Hauptgrund für die höhere Erwartung der Branche ist vor allem die Annahme eines relativ zu anderen Bioenergieanlagen stärkerer Zubaus von Biogasanlagen [BEE, 2009].

Tabelle 2.1: Technische Potenziale verschiedener Biomassen in Deutschland, zusammengestellt nach [Ramesohl und Arnold, 2006]

Substrat	Energetisch nutzbares Aufkommen	Energieträgerpotenzial [PJ]	
	[Mio. $\text{Mg}_{FM} \cdot \text{a}^{-1}$]	Festbrennstoff	Biogas
<i>Holz</i>	<i>44,9</i>	<i>563</i>	-
Waldrestholz	13,7	169	-
zusätzlich nutz. Waldholz	10,7	132	-
Schwachholz	10	123	-
Industrierestholz	4	57	-
Altholz	6	78	-
Landschaftspflegeholz	0,5	4	-
<i>Halmgut</i>	<i>14</i>	<i>192</i>	<i>31</i> ¹
Stroh	9,3	130	-
Gras, Dauergrünland	3,3	46	19
Landschaftspflegemat.	1,4	17	12
<i>sonstige Reststoffe</i>	<i>190,1</i>	-	<i>143</i> ¹
Exkrement & Einstreu	162,3	-	96
Ernterückstände	13,8	-	18
org. Siedlungsabfall	8,8	-	16
org. Industrie- und Gewerbeabfall	5,2	-	12,6
<i>Energiepflanzen</i>	<i>249</i>	<i>101</i>	<i>86</i> ¹

¹ Diese Stoffströme können entweder thermisch oder zur Biogasproduktion genutzt werden.

2.2 Politische und gesellschaftliche Ziele zur Biogasgewinnung und -nutzung

Die Nutzung von Biomassen, Rest- und Abfallstoffen als Energieträger wird zunehmend als Möglichkeit gesehen, die konventionelle Energieversorgung auf Basis fossiler Ressourcen in Richtung nachhaltiger Energiesysteme mit steigendem Anteil erneuerbarer Energien weiter zu entwickeln. In diesem Zusammenhang kann Biogas einen wichtigen Beitrag leisten, der aufgrund der Potenziale der Vergärung von Energie-

pflanzen und Abfallstoffen in Zukunft an Bedeutung gewinnt und einen wesentlichen Beitrag zu einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft liefert [Ramesohl und Arnold, 2006; Aretz und Hirschl, 2007; ATV-DVWK, 2003a; Niltch und Wenzel, 2009].

Neben den Fragen der Nutzungsmöglichkeiten, der Aufbereitung und Einspeisung ist insbesondere die Wirtschaftlichkeit derartiger Verfahren zu überprüfen und möglichst zu erhöhen. Gleiches gilt für hierdurch erreichbare ökologische Effekte.

Laut den aktuellen Daten des Bundesumweltministeriums zur Entwicklung der erneuerbaren Energien betrug der Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch Deutschlands im Jahr 2008 9,5 %; hiervon entfielen 6,6 %-Punkte auf den Bereich Biomasse (feste, flüssige und gasförmige Biomasse, biogener Anteil des Abfalls, Deponie- und Klärgas) [BMU, 2009]. Aus Potenzialanalysen geht hervor, dass Biogas perspektivisch bis zu 10 % der Stromerzeugung in der Bundesrepublik Deutschland abdecken kann [Jung und Postel J., 2009].

Im Jahr 2008 wurden aus fester und flüssiger Biomasse, Biogas, Deponie- und Klärgas sowie dem biogenen Anteil des Abfalls insgesamt 27 TWh Strom erzeugt, was 4,5 % des gesamten deutschen Bruttostromverbrauchs entspricht. Damit konnte die Biomasse ihren 2. Rang unter den erneuerbaren Energien im Strombereich hinter der Windenergie weiter festigen [BMU, 2009]. Hinsichtlich der Primärenergieträgeräquivalente ist die Biomasse deutlich vor der Windenergie einzuordnen. Dies gilt um so mehr für zukünftige Szenarien zur Nutzung erneuerbarer Energien [Schlesinger et al., 2010].

Der Beitrag des erneuerbaren Energieträgers Biogas ist in der Tabelle 2.2 zusammengestellt. Als derzeit gültige Methode zur Berechnung des Primärenergieäquivalents von Strom aus erneuerbaren Energien wird die Wirkungsgradmethode angegeben. Die Substitutionsmethode, die beispielsweise bei der Berechnung der durch erneuerbare Energien vermiedenen Emissionen und Brennstoffeinsätze angewandt wird, ist hier zusätzlich dargestellt. Thrän et al. [2009] machen höhere Angaben zur Stromerzeugung aus Biogas. Demnach betrug die potenzielle Stromerzeugung aus Biogas, welche auf Basis der zum Jahresende installierten Anlagenleistung geschätzt wird, etwa $10,5 \text{ TW}_{el}^1$. Unter Berücksichtigung des über das Jahr verteilten Zubaus von Neuanlagen im Jahr 2008 wird die reale Stromerzeugung aus Biogas von den Autoren geringer eingeschätzt, sodass von rund $9,2 \text{ TW}_{el}^2$ ausgegangen wird.

Laut Kehres [2007] werden derzeit jährlich etwa 10 Mio. Mg an Bio- und Grün-

¹Potenzielle Stromerzeugung auf Basis mittlerer Volllaststunden von 7.500 pro Jahr, wobei der Zeitpunkt der Inbetriebnahme von Neuanlagen nicht berücksichtigt ist.

²Für die Abschätzung der realen Stromerzeugung aus Biogas wurden folgende Annahmen getroffen: Für den Anlagenbestand bis Ende 2008 wurden 7.000 Volllaststunden, für Neuanlagen der 1. Jahreshälfte 5.000 Volllaststunden, 2. Jahreshälfte 1.600 Volllaststunden angenommen.

abfällen erfasst. In 880 Anlagen beschränkt sich die biologische Behandlung dieser Substrate auf aerobe Verfahren. In etwa 75 Anlagen (ca. 9%) sind Vergärungsstufen integriert - Tendenz steigend. Dieses entspricht einer anaeroben Behandlungskapazität von ca. 2,4 Mio. Mg/a [Fricke et al., 2007b]. Scholwin und Nelles [2009] berichten von etwa 85 in der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. erfassten Vergärungsanlagen, die großteils kommunale, getrennt gesammelte Bioabfälle verwerten. Zusätzlich existiert eine Anzahl von Anlagen, die teilweise oder auch vorwiegend industrielle organische Reststoffe und auch kommunale Bioabfälle verwerten. Die Anzahl wird auf 100 - 300 geschätzt [ebd.].

Kaltschmitt et al. [2006] errechnet unter Bezugnahme auf verschiedene andere Quellen für organische Abfälle aus Haushalten und Kommunen sowie Marktabfällen ein Biogaspotenzial von rund 0,6 Mrd. m³/a. Aus organischen Gewerbe- und Industrieabfällen wären zusätzlich zwischen 0,3 und 0,6 Mrd. m³/a an Biogas zu erwarten. Unter Einbeziehung weiterer Stoffgruppen (landwirtschaftliche Rückstände, Klärschlämme, Deponiegas) errechnet sich für Abfälle und Reststoffe ein Biogaspotenzial für Deutschland von rund 11 bis 14 Mrd. m³/a [ebd.]. Bei einem mittleren unterstellten Methananteil von rund 60 % entspricht dieses einem Methanaufkommen von 6 bis 9 Mrd. m³/a.

Der Beitrag erneuerbarer Energien zum Klimaschutz ist größer als zur Energieversorgung. So wurden in Deutschland durch die Nutzung erneuerbarer Energien im Jahr 2008 etwa 109 Mio. t CO₂ (ausgedrückt als CO₂-Äquivalente) vermieden, d.h. ohne ihre Nutzung wären die gesamten CO₂-Emissionen (ca. 748 Mio. Tonnen) rund 15 % höher gewesen [BMU, 2009]. Auf den Sektor Biogasgewinnung entfielen hiervon 6,2 % (6,8 Mio. t CO₂), auf die Nutzung des biogenen Anteils des Abfalls 4,8 % (5,2 Mio. t CO₂). Dies sind in Summe 12 Mio. t CO₂-Äquivalente, die durch die Nutzung dieser Stoffe als regenerativer Energieträger vermieden werden konnten.

Auf dem Gebiet der europäischen Union ist der Beitrag, der durch die energetische Nutzung von Biogas geleistet wird, eher unterrepräsentiert. Die gesamte installierte Leistung zur Strombereitstellung auf Basis von erneuerbaren Energietechnologien liegt gemäß BMU [2009] bei rund 190 GW. Lediglich 2 % hiervon entfallen auf den Biogassektor. Der Beitrag erneuerbarer Energien zur Wärmeerzeugung lag 2007 europaweit mit 642 TWh lediglich bei insgesamt 10 %. Hiervon wurden nur 4,5 TWh (0,7 %) aus Biogas bereitgestellt.

Tabelle 2.2: Beitrag des Biogases als erneuerbare Energie zur Energiebereitstellung in Deutschland, nach [BMU, 2009].

End- energie	Primärenergie- äquivalent ^a		Anteil am Endenergie- verbrauch	Anteil am gesamten Primärenergieverbrauch ^b	
	Wirkungs- methode	Substitutions- methode		Wirkungs- gradmethode	Substitutions- methode
[TWh]	[TWh]	[TWh]	[%]	[%]	[%]
Strom- erzeugung	Biogas	8,05	19,53	19,5	
	Summe aller Energieträger	92,78	131,53	227,11	
Wärme- erzeugung	biogene gasf. Brennstoffe ^d	5,07	5,06	Anteil am Strom- verbrauch ^c	Anteil am EEV für Wärme ^e
	Summe aller Energieträger	103,76			
gesamt (ohne Kraftstoffe)		196,53	235,28	330,86	

^aErläuterung der Methodik s. Quelle

^bbei einem Substitutionsfaktor (für Strom aus Biomasse) von 8,733 kJ/kWh

^cbezogen auf den Bruttostromverbrauch 2008 von 615,1 TWh

^dgeschätzt; enthält Wert zur Direktnutzung von Klärgas

^eEEV für Raumwärme, Warmwasser und sonstige Prozesswärme 2008 172,3 Mio. t SKE oder 5.050 PJ

Massive Unterstützung erhält die Biogas-Technologie durch die Aufwertung regenerativer Energien hinsichtlich ihrer nachhaltigen Funktion für den Klima- und Ressourcenschutz, dokumentiert wird dies in Deutschland auch durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) und die Biomasseverordnung. Seit der Novellierung des EEG im Jahr 2004 nimmt die Anzahl von Biogasanlagen in Deutschland deutlich zu. Ende 2008 umfasste der Anlagenbestand rund 4.100 Biogasanlagen mit einer installierten elektrischen Anlagenleistung von rund 1.435 MW_{el}. Im Vergleich zu den Vorjahren wurden in 2008 allerdings mit etwa 350 neu installierten Biogasanlagen deutlich weniger errichtet als im Vorjahr (Anlagenzubau in 2007 ca. 450; in 2006 ca. 600 Anlagen) (vgl. Abbildung 2.1). Dieser verhaltene Zubau liegt in erster Linie in der EEG-Neufassung 2009 begründet. So wird ein deutlicher Zubau weiterer Biogasanlagen aufgrund deutlich höherer Vergütungssätze auf Basis des EEG 2009 – insbesondere für die Stromerzeugung aus Biogas – im Jahr 2009 und in den Folgejahren erwartet [Thrän et al., 2009].

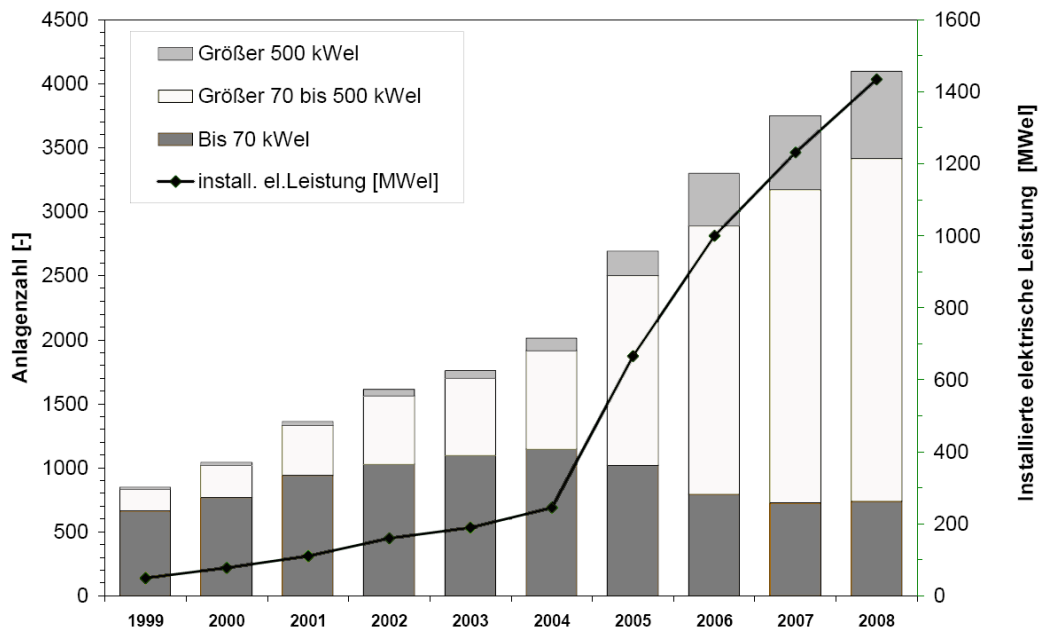


Abbildung 2.1: Biogasanlagenentwicklung in Deutschland (Anlagenzahl differenziert nach Leistungsklassen und installierte elektrische Anlagenleistung MW_{el}) [Thrän et al., 2009]

Die Einführung des KWK-Bonus (Bonus für installierte Kraft-Wärme-Kopplung) im EEG 2004 als Anreiz zur Steigerung der Gesamteffizienz hat zu einer erheblichen Zunahme der Abwärmenutzung bei der Stromerzeugung aus Biogas geführt.

Aufgrund der Erhöhung des KWK-Bonus durch die Neufassung des EEG 2009 ist zu erwarten, dass sich der Grad der Wärmenutzung weiter erhöhen wird. Eine Zunahme der Relevanz anaerober Verfahren wird auch durch die zunehmende Nachrüstung von Vergärungsstufen auf Kompostanlagen sowie einen Trend zu einer höheren Technikeffizienz erkennbar, aus denen sich durchaus Synergieeffekte zwischen Anlagenwirtschaftlichkeit und Umwelt-/Klimaschutz ergeben [Jung und Postel J., 2009].

Kapitel 3

Grundlagen

3.1 Biochemische Grundlagen des anaeroben Abbaus organischer Substrate

3.1.1 Mikrobielle Grundlagen des anaeroben Abbaus

Biogas wird durch Mikroorganismen in einer anaeroben Stoffwechselkette gebildet. Zur Gewährleistung eines anaeroben Abbaus muss das zur Verfügung stehende Substrat für die anaerobe Mikrobiozönose verfügbar sein. Da dies nicht für alle organischen Stoffe in gleichem Maße gilt (s. Kapitel 3.2), können unterschiedliche Vorbehandlungsverfahren eingesetzt werden, um schwer zugängliche Substrate für einen anaeroben Abbau verfügbar zu machen (s. Kapitel 4).

Anaerobe Organismen können aufgrund der geringen Energieausbeute der sauerstofffreien Oxidation nur etwa 1/20 der Energie aerober Bakterien (oftmals noch weniger) in Form von ATP gewinnen [Thauer et al., 1977; Thauer und Morris, 1984]. Bei der anaeroben Oxidation von schon weitgehend oxidierten Kohlenstoffverbindungen, wie z.B. Acetat, können sogar nur etwa 1/3 ATP pro Mol Substrat gewonnen werden. Mit derartig geringen Energieausbeuten gehen eine Biomassereduktion der beteiligten Biozönose und eine Verlangsamung der Wachstumsgeschwindigkeit einher [Scherer, 2001]. Die enzymatisch katalytischen Abbauvorgänge werden hierdurch jedoch nicht verlangsamt. Aufgrund der hieraus resultierenden geringen Bildung überschüssiger Biomasse – Thauer et al. [1977] geben Werte zwischen 3 und 6 % des umgesetzten Kohlenstoffes an – kann die in den vergärbaren Stoffen vorhandene Energie bis hin zum Abbauprodukt Methan erhalten bleiben. Scherer [2001] gibt hierfür einen Wert von ca. 21 kJ (6 kWh bzw. 1 m³ Biogas) pro kg organischer Trockensubstanz an.

3.1.2 Stufen des anaeroben Abbaus

Nach aktuellem Stand der Forschung kann der anaerobe Abbau organischer Substanzen in die Hauptkomponenten Methan (CH_4) und Kohlendioxid (CO_2) in vier aufeinander folgende Abbauschritte unter Beteiligung verschiedener Mikroorganismengruppen eingeteilt werden. Diese anaeroben Abbauschritte laufen in der Natur überall dort ab, wo organische Materie unter Sauerstoffabschluss umgesetzt wird. Bei der Vergärung bauen – anders als beim aeroben Abbau – ausschließlich Bakterien organische Masse ab. Der anaerobe Abbau wird durch verschiedene Bakteriengruppen realisiert, welche in Serie und in Symbiose einzelne Teilschritte des Abbaus vollziehen und aufeinander angewiesen sind. Diese einzelnen Bakteriengruppen haben – u.a. auch in Abhängigkeit des verwendeten Ausgangsmaterials – zum Teil unterschiedliche Wachstumsgeschwindigkeiten [Scholwin et al., 2009]. Die Geschwindigkeit des Gesamtabbaus wird demnach vom langsamsten Abbauschritt bestimmt. Der anaerobe Abbauvorgang wurde von verschiedenen Autoren ausführlich beschrieben [Schlegel et al., 2007; Kunst, 2005; FNR, 2006; Reineke und Schlömann, 2007; Scholwin et al., 2009; Scherer, 2002] und soll an dieser Stelle vereinfacht dargestellt werden. Nachfolgend werden die vier Stufen des anaeroben Abbaus beschrieben. Eine schematische Darstellung des anaeroben Abbauprozesses zeigt die Abbildung 3.1.

Hydrolyse: In der ersten Stufe, der Hydrolyse, spalten hydrolytische und fermentative Bakterien die polymeren Verbindungen wie Kohlenhydrate, Proteine und Fette mit Hilfe von Exoenzymen in kurzkettige und lösliche Komponenten (zunächst in Monomere wie Aminosäuren und Zucker, dann in niedere Fettsäuren, Milchsäure, Alkohole usw.). An dieser Reaktion sind sowohl fakultativ als auch obligat anaerobe Bakterienstämme beteiligt. Hinsichtlich der Hydrolysierbarkeit sind die Stoffgruppen, aus denen organische Substrate zusammengesetzt sind, unterschiedlich einzustufen. Die Kohlenhydrate Zucker und Hemicellulosen sind sehr gut hydrolysierbar, während Cellulosen, Stärke und Pektin langsamer hydrolysieren und Lignin als nicht hydrolysierbar gilt [Kunst, 2005]. Aufgrund der stofflichen Zusammensetzung vieler organischer Stoffe und insbesondere deren Gehalt an Lignocellulosen ist die Hydrolyse oftmals der geschwindigkeitsbestimmende Schritt.

Strukturarme Kohlenhydrate (Mono- und Disaccharide) sind einfacher zu hydrolysieren als strukturreiche Kohlenhydrate (Polysaccharide), da deren chemisch komplexe Verbindungen zunächst aufgebrochen werden müssen. Es kann daher empfehlenswert sein, vorgeschaltete Aufbereitungsschritte vorzusehen (s.

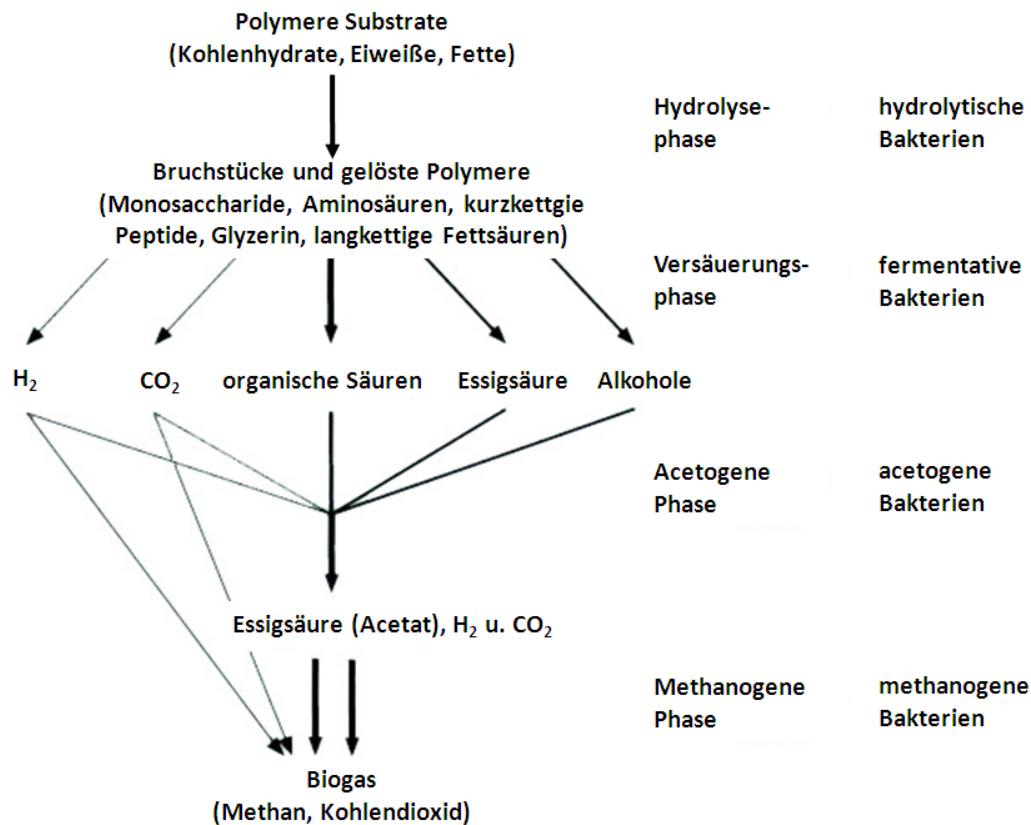


Abbildung 3.1: Schema des mehrstufigen anaeroben Abbaus, nach Kunst [2005]; verändert

Kapitel 4). Die Umsatzrate von Eiweiß ist aufgrund der Komplexität der Eiweißhydrolyse geringer als die der Kohlenhydrate. Proteinasen sind in der Lage Peptidbindungen zu hydrolysieren und leiten damit den Proteinabbau ein [Morihara und Oda, 1992]. Fette können leicht umgesetzt werden.

Neben technischen Faktoren der Vergärung (u.a. Durchmischung, Verweildauer, Temperatur) und der Bakterienkonzentration ist die Hydrolysegeschwindigkeit abhängig von der Größe und der spezifischen Oberfläche der Substratpartikel [ATV, 1994]. Die erste Stufe des anaeroben Abbaus kann durch zusätzliche Aufschlussprozesse beschleunigt und in ihrer Leistung verbessert werden. Hierzu existieren zahlreiche Behandlungsansätze (s. Kapitel 4). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein weiteres Verfahren zur Vorbehandlung und Beeinflussung der Hydrolyseleistung erprobt und auf seine Wirksamkeit hin untersucht

Acidogenese/Versäuerung: In der Versäuerungsphase werden von verschiedenen

fakultativ und obligat anaeroben Bakterienarten kurzkettige organische Säuren (z.B. Buttersäure, Propionsäure, Essigsäure), Alkohole, H_2 und CO_2 gebildet. Von diesen Zwischenprodukten können lediglich Essigsäure, H_2 und CO_2 direkt von den Methanbakterien zu Methan umgesetzt werden. Das Verhältnis, der in der Acidogenese gebildeten Zwischenprodukte ist stark von der Konzentration des gebildeten Wasserstoffs abhängig. Hohe Wasserstoffkonzentrationen als Folge einer nicht vollständig ablaufender Methanogenese führen zu einem Absinken des pH-Wertes. Dies führt zu einer geringeren Bildung an Essigsäure durch einen gehemmten Abbau langkettiger organischer Säuren. Niedrige pH-Werte sind weiterhin ursächlich für erhöhte Schwefelwasserstoffkonzentrationen (H_2S). Zu hohe pH-Werte hingegen führen zu erhöhten Ammoniakkonzentrationen (NH_3). NH_3 und H_2 hemmen bei erhöhten Konzentrationen die Methanogenese. Vor allem bei der Vergärung von Kohlenhydraten, die leicht versäuerbar sind und keine pH-puffernden Ionen freisetzen, neigt der pH-Wert dazu abzusinken [Junghans, 1987].

Die möglichen Produkte der Versäuerung sind unterschiedlich gut als Substrat für die nachfolgenden Abbaustufen geeignet. So erfolgt laut Joss [1999] der Abbau von Propionat zu Acetat in der Acetogenese nur bei geringem Wasserstoffpartialdruck und erst wenn alle anderen Substrate aufgebraucht sind. Der Propionsäureabbau kann somit zum limitierenden Schritt des anaeroben Abbauprozesses werden. Das Ziel einer technischen Vergärung muss es daher sein, Prozessbedingungen sicher zu stellen, die zu der gewünschten Gärung bzw. zu den geeigneten Versäuerungsprodukten führen. So sollten Substrate aus der Hydrolyse/Versäuerung möglichst wenig Propionsäure enthalten. Butter- und Essigsäure sind demgegenüber nach bisherigen Erkenntnissen gut geeignete Substrate [Taddigs, 2000].

Acetogenese: In der Acetogenese werden die im vorangegangenen Schritt gebildeten organischen Säuren und Alkohole zu Essigsäure (Acetat) umgesetzt. Die acetogenen Bakterien müssen aus reaktionskinetischen Gründen eng mit den Methanbakterien vergesellschaftet sein, da sie mit diesen hinsichtlich der wechselseitigen Nahrungsansprüche in einem symbiontischen Verhältnis stehen. Dem Wasserstoff kommt hierbei eine Schlüsselrolle zu, denn nur bei sehr niedrigem Wasserstoffpartialdruck können beispielsweise Reaktionsprodukte, wie Propion- oder Buttersäure, noch mit einem kleinen Energiegewinn in Essigsäure umgewandelt werden. Die Methanbildner erhalten jedoch von den acetogenen Bakterien die für das Wachstum benötigten Substrate Wasserstoff, Kohlend-

oxid und Essigsäure (Syntrophie-Beziehung). Bedingung für diese Kopplung ist ein enger Zellkontakt zwischen Wasserstoff produzierenden acetogenen und Wasserstoff verbrauchenden methanogenen Bakterien (Interspecies Hydrogen Transfer). Dies führt zur Bildung von Agglomeraten, die beide Organismengruppen beinhalten [Taddigs, 2000; Kunst, 2005]. Die acetogenen Bakterien wachsen sehr langsam. Die Generationszeiten liegen, ähnlich wie bei den methanogenen Bakterien, bei mehreren Tagen.

Methanogenese: In der Methanogenen-Phase bilden acetotrophe Bakterien Methan hauptsächlich aus Essigsäure (ca. 70 %). Im geringeren Umfang erfolgt die Bildung von Methan aus Wasserstoff und Kohlendioxid durch hydrogenotrophen Bakterien (ca. 30 %) [Kunst, 2005]. Auch wenn die hydrogenotrophe Bakterien nur einen geringen Beitrag zur Methanbildung leisten, so reduzieren sie den Wasserstoffpartialdruck auf ein für die acetogenen Bakterien verträgliches Maß. Da in den Ausgangssubstraten nicht genug Wasserstoff enthalten ist, verbleibt immer auch ein Rest CO_2 . Aufgrund des nur geringen Energiegewinns der methanogenen Stoffwechselreaktionen wachsen die Methanbildner sehr langsam. Dieses geringe Wachstum erfordert bei der technischen Durchführung von Gärprozessen lange Biomasseverweilzeiten, um einen ausreichenden Stoffumsatz sicher zu stellen.

Innerhalb des beschriebenen vierphasigen anaeroben Abbaus existieren unterschiedliche Abbauewege (Abbildung 3.2). Das vorliegende Substrat, dessen Aufbereitung bzw. Vorbehandlung und die Prozessbedingungen beeinflussen den Verlauf des mikrobiellen Abbaus.

Alle Prozesse laufen in Biogasanlagen meist zeitgleich ab, jedoch oft nicht mit der gleichen Geschwindigkeit. Der Abbau eines komplexen organischen Stoffes zu Methan kann nur so schnell vonstatten gehen, wie für die methanogenen Bakterien verwertbare Substrate bereitgestellt werden. Der Umbau der „Bruchstücke“ in der Versäuerungs-Phase sowie die Methanbildung aus Acetat in der Methanogenen-Phase verläuft in der Regel ohne Schwierigkeiten. So gesehen ist die Acetogene-Phase der geschwindigkeitslimitierende Schritt des vollständigen anaeroben Abbaus [Kunst, 2005]. Der die Geschwindigkeit bestimmende Schritt ist bei den meisten Vergärungsprozessen jedoch die Hydrolyse, da erst dann, wenn die fermentativen Bakterien die Polymere in für die nachfolgenden Bakteriengruppen angreifbare Substanzen zerlegt haben, ein vollständiger Abbau bis zu CO_2 und CH_4 stattfinden kann. Speziell Cellulose und Hemicellulose, die z.B. in biogenen Abfällen häufig vorkommen, sind durch die Bakterien nur langsam zu hydrolysieren. Nur wenn große Mengen an leicht

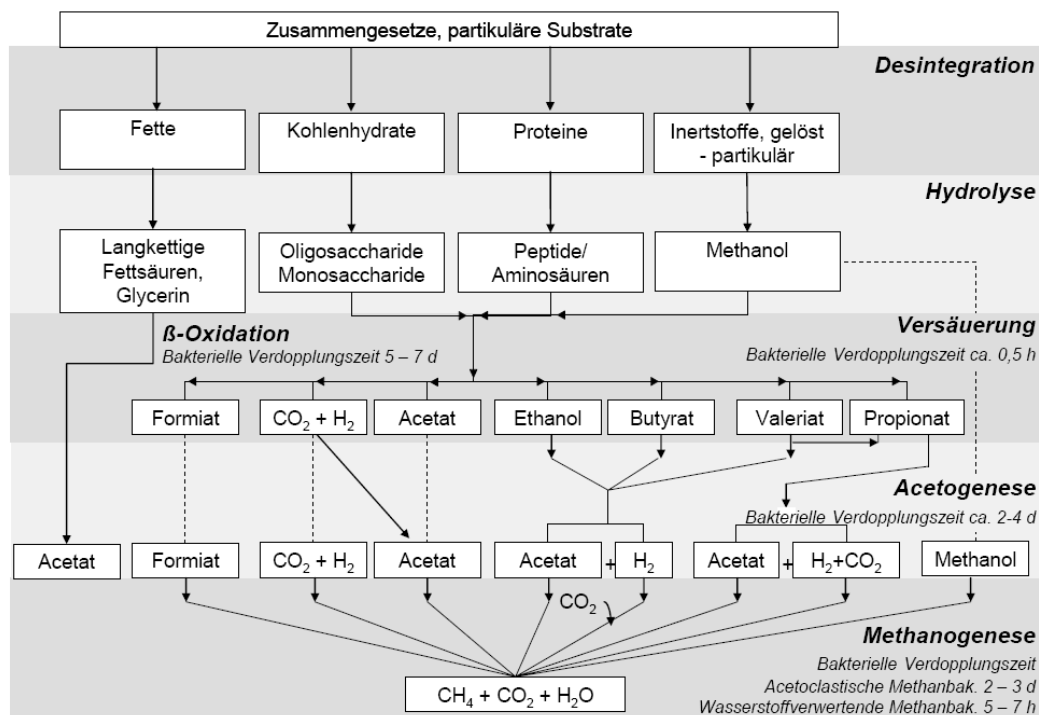


Abbildung 3.2: Vereinfachte Übersicht der wichtigsten Prozesse des anaeroben Abbaus, verändert nach Kunst [2005]; Langhans [1999]; Santen [2007]

abbaubaren Substraten vorliegen, kann der weitere Verlauf der Methanbildung zum bestimmenden Schritt für die Geschwindigkeit werden, da sich die Säurebildner in diesem Fall relativ rasch vermehren [Scholwin et al., 2009]. Liegt das Substrat jedoch als Feststoff oder in Form ungelöster Polymere vor, so ist der geschwindigkeitsbestimmende Schritt die Hydrolyse [Scherer, 2002; ATV, 1994].

Bei der biologischen Verwertung und Behandlung fester organischer Reststoffe können Maßnahmen ergriffen werden, die der Unterstützung der Hydrolyse dienen. Mit derartigen Maßnahmen soll eine Beschleunigung des Abbaus herbeigeführt werden. Zu diesen Maßnahmen gehören u.a. die Zugabe hydrolysierender Enzyme oder verschiedene Vorbehandlungsmethoden, die eine Erhöhung der Substratoberfläche und eine Freisetzung von Zellinhaltsstoffen bewirken sollen (s. Kapitel 4).

3.2 Zusammensetzung und Abbauverhalten organischer Substrate

3.2.1 Zusammensetzung organischer Substrate

Organische Substrate setzen sich im Wesentlichen aus den Makromolekülen der Fette, Proteine und Kohlenhydrate zusammen. Kaltschmitt [2009] definiert den Oberbegriff Biomasse als Summe sämtlicher Stoffe organischer Herkunft (d.h. kohlenstoffhaltige Materie). Diese beinhaltet damit die in der Natur lebende Phyto- und Zoomasse, die daraus resultierenden Rückstände, abgestorbene (aber noch nicht fossile) Phyto- und Zoomasse und im weiteren Sinne alle Stoffe, die beispielsweise durch technische Umwandlung und/oder eine stoffliche Nutzung entstanden sind bzw. anfallen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden organische Substrate pflanzlicher Herkunft untersucht. Diese Stoffgruppe bildet den größten Anteil anaerob umzusetzbarer biogener Reststoffe.

Die Qualität des eingesetzten Substrates wirkt sich deutlich auf dessen Abbaubarkeit im Fermenter aus. Hierbei bewirkt ein hoher Rohfasergehalt, der meist einhergeht mit höheren Konzentrationen an Lignozellulosekomplexen, dass die organischen Bestandteile nicht oder nur bedingt für den anaeroben mikrobiellen Abbau zugänglich sind. Diese Problematik wurde in einer Vielzahl von Untersuchungen festgestellt [Amon, 2006; Scholwin et al., 2009; Lemmer, 2005; Kaiser, 2008; Krieg, 2000; Mundhenke, 2002].

Organische Substanzen können nach Fricke et al. [2002] hinsichtlich ihrer anaeroben Abbaubarkeit in vier Gruppen unterteilt werden:

1. Leicht abbaubar: Zucker (insbesondere Mono- und Disaccharide), Stärke, Fette und Proteine,
2. mittel bis schwer abbaubar: Hemicellulosen, Cellulosen und einige Fette,
3. schwer bis nicht abbaubar: Lignocellulosen, Lignin, verschiedene Harze und Wachse,
4. nicht abbaubar: Leder, Gummi und Kunststoffe.

Die Abbaubarkeit relevanter biochemischer Stoffgruppen ist in der Abbildung 3.3 schematisch dargestellt.

Die für den anaeroben Abbau wesentlichen Stoffgruppen (Proteine, Fette und Kohlenhydrate – hier Cellulose, Hemicellulose sowie Lignin) werden an dieser Stelle detaillierter beschrieben, da die Zusammensetzung organischer Substrate sowie deren

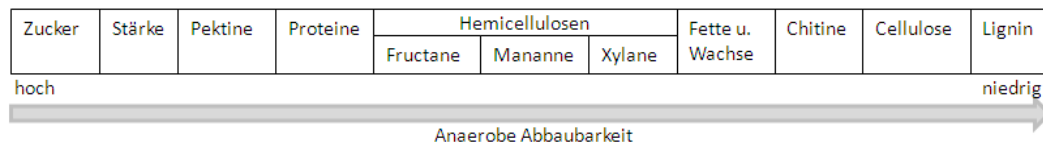


Abbildung 3.3: Abbaubarkeit organischer Stoffe, nach Ottow und Bidlingmaier [1997]; verändert

Abbaubarkeit für das im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersuchte Verfahren von Bedeutung ist.

Proteine: Proteine sind aus Aminosäuren aufgebaute Polypeptide und wichtiger Bestandteil der Zellen. Proteinasen sind in der Lage Peptidbindungen zu hydrolysieren und leiten damit den Proteinabbau ein [Moriyama und Oda, 1992]. In der Praxis treten bei der Vergärung insbesondere proteinreicher Abfälle erhebliche Prozessstörungen auf, die die Stoffwechselaktivität der Mikroorganismen bis zum Erliegen der Biogasproduktion hemmen können. Proteine gehören dennoch zu den Stoffen, die zum größten Teil relativ leicht abbaubar sind. Ihre Vergärbarkeit ist von der Zusammensetzung der Aminosäuren abhängig. Die Anwesenheit von Lignin in einem Substrat kann einen negativen Einfluss auf die Abbaubarkeit der Proteine haben, da Proteine über Phenole in der Faserfraktion eingebunden sind [Meak, 2002].

Fette: Fette sind Reserve- und Speichersubstanzen in pflanzlichen und tierischen Zellen und können leicht bis mittelmäßig durch Mikroorganismen abgebaut werden. Die Abbaubarkeit der Fette hängt ab von verschiedenen Merkmalen der Fettsäuren, aus denen die Fette zusammengesetzt sind. Sie ist vor allem durch die Menge an Fett, die Kettenlänge der Fettsäuren und den Grad der Sättigung der Fettsäuren bestimmt [Bekker, 2007]. Es existiert eine große Vielfalt an Lipasen und verschiedenen Wegen der Hydrolyse; diese sind ausführlich in Brune und Götz [1992] dargestellt.

Kohlenhydrate: Kohlenhydrate sind entsprechend deren Molekülgrößen in Monosaccharide (z.B. Glucose, Fructose), Oligosaccharide (z.B. Lactose, Saccharose, Maltose) und Polysaccharide (z.B. Stärke, Cellulose, Lignin) einzuteilen. Hinsichtlich der anaeroben Abbaubarkeit lassen sich Kohlenhydrate in strukturarmer bzw. leicht abbaubare Kohlenhydrate (z.B. Monosaccharide, Disaccharide, Stärke) und strukturreiche Kohlenhydrate (z.B. Cellulose, Hemicellulose) un-

terteilen. Diese Einteilung beruht darauf, dass die strukturreichen Kohlenhydrate nicht wie die strukturarmen Kohlenhydrate direkt von den Mikroorganismen aufgenommen werden können. Die strukturreichen Kohlenhydrate müssen zunächst mittels extrazellulären Enzymen in strukturarme Kohlenhydrate aufgespaltet werden, um weiterführend anaerob verwertet werden zu können. Je komplexer die Struktur der Kohlenhydrate ist, desto mehr Enzyme sind an der Hydrolyse beteiligt und desto länger ist die Hydrolysezeit [Schlegel et al., 2007].

- **Stärke:** Stärke gehört als einer der wichtigsten Reservestoffe in pflanzlichen Zellen zu den strukturarmen Polysacchariden und somit zu den leicht abbaubaren Kohlenhydraten. Stärke kann unter Hitzeeinwirkung ein Vielfaches ihres Eigengewichtes an Wasser physikalisch binden, aufquellen und verkleistern. Beim Erhitzen mit Wasser quillt die Stärke bei $47 - 57\text{ }^{\circ}\text{C}$, die Schichten platzen. Bei $55 - 87\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Kartoffelstärke bei $62,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, Weizenstärke bei $67,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) entstehen Stärkekleister, welche je nach der Stärkesorte verschiedene Steifungsvermögen aufweisen. Diese Eigenschaft kann insbesondere bei Vorbehandlungsverfahren mit Erwärmung relevant werden.
- **Cellulose und Hemicellulose:** Cellulosen sind vor Hemicellulosen die mengenmäßig bedeutendsten organischen Moleküle. Pflanzenzellwände bestehen vor allem aus Cellulosemikrofasern, die in einer Lignin- und Hemicellulosematrix eingebettet sind, sowie Pektin [Ottow und Bidlingmaier, 1997]. Die bei der Cellulose überwiegenden kristallinen Bereiche bewirken die Dehnbarkeit, Festigkeit, Kohäsion und Widerstandsfähigkeit gegenüber chemischen Einwirkungen [Knackmuss, 1997]. Daher lösen sich bzw. hydrolysieren diese Bereiche nur schwer. Im Gegensatz zu Cellulose hat Hemicellulose eine eher zufällige, amorphe und verzweigte Struktur mit einer geringeren Resistenz gegen hydrolytische Prozesse [Morohoshi, 2001; Ademark et al., 1998]. Durch die daraus resultierende höhere Wasserlöslichkeit werden Hemicellulosen im Allgemeinen schneller abgebaut als Cellulosen [Knackmuss, 1997]. Der Abbau von Cellulose ist nur relativ wenigen Mikroorganismen möglich und erfolgt aufgrund der Molekülgröße hydrolytisch durch cellulolytische Exoenzyme.
- **Lignin:** Mit zunehmendem Alter pflanzlicher Zellen wird Lignin in die Zellwand inkrustiert. Lignin ist ein komplexes amorphes Mischpolymer aus Phenylpropanen, die zu einem dreidimensionalen Gitter vernetzt und über kovalente Bindungen mit den Zellwandkohlenhydraten verknüpft

sind [Nultsch, 2001]. Lignin enthält, im Gegensatz zu Cellulose und Hemicellulose, nahezu keine hydrolysierbaren Bindungen. Zusammen mit einer stark vernetzten Struktur und einem hohen Molekulargewicht erschwert dies den Abbau durch Mikroorganismen [Knackmuss, 1997]. Lignin wird von keinem bekanntem Organismus als ausschließliche Energiequelle genutzt [Leisola und Garcia, 1989]. Im Ligno-Cellulosekomplex pflanzlicher Rohstoffe ist die vergärbare Cellulose durch Inkrustierungen von Lignin vor einem enzymatischen Angriff geschützt [Meak, 2002; Leisola und Garcia, 1989].

Biomasse besteht zum überwiegenden Teil aus hochpolymeren organischen Substanzen. Niedermolekulare organische Verbindungen kommen nur in sehr geringem Maße vor. Die Zusammensetzung der hochmolekularen organischen Moleküle unterscheidet sich stark zwischen Tieren und Pflanzen. Aus der Tabelle 3.1 geht hervor, dass Gerüststrukturen aus Kohlenhydraten wie Cellulose, Hemicellulose und Lignin mindestens 60 % der Pflanzenmasse ausmachen, wohingegen bei Tieren Proteine, Polymere aus Aminosäuren, bis zu 80 % der Biomasse ausmachen können [Eikmanns und Eikmanns, 2001].

Tabelle 3.1: Zusammensetzung pflanzlicher und tierischer Biomasse, nach [Eikmanns und Eikmanns, 2001]

Bestandteil	%-Anteil in pflanzlicher Biomasse	%-Anteil in tierischer Biomasse
Cellulose	30 - 50	-
Lignin	15 - 30	-
Hemicellulose	15 - 25	-
Pektin	3 - 10	-
Stärke	2 - 3	-
Glykogen	-	5 - 10
Protein	2 - 5	50 - 80
Lipide	2 - 5	10 - 15
Nucleinsäuren	2	5
Gelöste Polymere	<5	<5

Grundsätzlich gilt, dass im Allgemeinen die anaerobe Abbaubarkeit organischer Stoffe mit der Konzentrationserhöhung der Kohlenwasserstoffe sinkt, da diese nur einem sehr langsamen fermentativen Abbau zugänglich sind [Bekker, 2007]. Der Methangehalt im Biogas ist umso höher, je reduzierter die organische Substanz ist, d.h. je größer das Verhältnis von Kohlenstoff zu Sauerstoff im Substrat ist [Hartmann, 1992]. Theoretische Biogaserträge und Methangehalte der wesentlichen Stoffgruppen sind in der Tabelle 3.2 aufgeführt.

Tabelle 3.2: Spezifische theoretische Biogaserträge und Methangehalte (nach Angaben von [Ottow und Bidlingmaier, 1997; Weiland, 2001a; Langhans, 1997; Roediger et al., 1990; VDI 4630, 2006])

Stoffgruppe	Spez. Biogasertrag [Nl/kg oTS]	Methangehalt [Vol.-%]
Kohlenhydrate	750 - 960	50 - 60
Glucose	750	50
Cellulose	960	60
Hemicellulose	750	50 - 60
Stärke	830	50
Proteine	600 - 890	70 - 75
Fette/Lipide	1.250 - 1.430	68 - 73

3.2.2 Abbauverhalten organischer Substrate

Mit dem in der vorliegenden Arbeit untersuchten Verfahren sollte ein möglichst weitgehender Aufschluss organischer Substanz erreicht werden (vgl. Kapitel 4.5 und 4.4.6). Dabei sollte neben dem Aufschluss vorhandener Faser- und Verbundstrukturen auch ein möglicher Aufschluss auf zellulärer Ebene eingeschlossen sein.

Der grundsätzliche Aufbau organischer Materialien pflanzlicher Herkunft auf zellulärer Ebene ist in der einschlägigen Fachliteratur (z.B. Nultsch [2001]; Kück und Wolff [2009]) hinreichend beschrieben. Es wird an dieser Stelle daher nur auf einige wesentliche Zusammenhänge in Bezug auf die anaerobe Verfügbarkeit und einen möglichen vorherigen Aufschluss eingegangen.

Pflanzenzellen haben je nach Pflanzenart eine Länge von bis zu 500 μm und einen Durchmesser zwischen 20 und 200 μm . Im Gegensatz zu tierischen Zellen (10 - 100 μm) sind sie von einer Zellwand umgeben, die der pflanzlichen Zelle Schutz bietet

und sie auch gegen den osmotischen Druck des Zellinhalts stabilisiert [Mundhenke, 2002; Palmowski, 2000]. Die Wand der Pflanzenzelle stellt ein äußerst reißfestes, dabei jedoch potenziell plastisch dehnbares Verbundmaterial dar. Wie viele technische Verbundmaterialien besitzt die Zellwand ausgeprägte viskoelastische Eigenschaften. Die Wand muss einerseits Turgor-Drücken von 5 bis 15 bar standhalten und andererseits zu einem raschen Flächenwachstum befähigt sein [Schopfer, 2006]. Auf die Widerstandsfähigkeit pflanzlicher Zellen gegen Druck wird in Kapitel 3.2.3 detaillierter eingegangen.

Die pflanzliche Zellwand besteht im Wesentlichen aus vier Schichten, die sich sowohl bezüglich der Zusammensetzung als auch des Zeitpunktes der Entstehung während des Zellwachstums unterscheiden (Abbildung 3.4). Der genaue Aufbau ist unter anderem bei Palmowski [2000], Baaden [2003] und Nultsch [2001] beschrieben. Insbesondere die Primärwand ist sehr elastisch, kann aber auch plastisch gedehnt und verformt werden. Die Sekundärwand gibt der Zelle aufgrund ihres hohen Cellulosegehaltes die mechanische Festigkeit. In der Kombination hoher Elastizität und gleichzeitiger mechanischer Festigkeit kann die Ursache für die hohe Widerstandskraft pflanzlicher Zellen gegen physikalische Einwirkungen vermutet werden.

Die Hauptkomponente der Zellwand ist Cellulose. Die Struktur der Cellulosefibrillen (fadenförmige Makromoleküle) ist zum Teil so regelmäßig, dass einzelne Bereiche eine kristalline Anordnung aufweisen können [Jayme und Knolle, 1964]. Aus dem Aufbau der Cellulose ergeben sich Eigenschaften wie die Unlöslichkeit in Wasser, die Quellfähigkeit sowie die hohe mechanische Festigkeit.

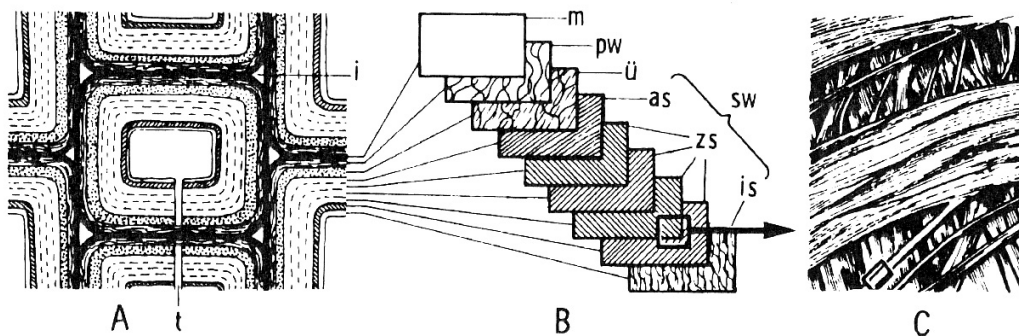


Abbildung 3.4: Mikroskopischer Aufbau der pflanzlichen Zellwand, A: schematische Zellwandschichtung; B: Textur der einzelnen Schichten, schematisch; C: Sekundärwandschichtung nach einer EM-Aufnahme; m: Mittellamelle; pw: Primärwand; ü: Übergangslamelle; as: Außenschicht; zs: Zentralschicht; is: Innenschicht; sw: Sekundärwand; i: Intrazellularen; t: Tüpfel; aus Nultsch [1996]

Die Gewichtung des Einflusses verschiedener physikalischer und chemischer Größen auf die Hydrolisierbarkeit von z.B. Stroh ergibt laut Gharpuray et al. [1983] folgende Reihenfolge: Den größten Einfluss hat die spezifische Oberfläche (intern und extern), gefolgt vom Ligningehalt und dem Kristallinitätsindex. Zu einer vergleichbaren Einteilung kommen auch Taherzadeh und Karimi [2008] nach der Auswertung diverser weiterer Literaturangaben.

In der Tabelle 3.3 sind die Anteile der mittel und schwer abbaubaren Komponenten verschiedener organischer Reststoffe aufgeführt. Insbesondere diese Komponenten sind einem raschen anaeroben Abbau – je nach Adaption der eingesetzten Mikrozonose – nur bedingt zugänglich und stellen somit die Stoffgruppen, die Potenziale für eine Optimierung des anaeroben Abbaus durch eine effektive Vorbehandlung bieten.

Tabelle 3.3: Cellulose-, Hemicellulose- und Ligninanteil von verschiedenen Abfallkomponenten (in Prozent des Trockengewichtes) verändert nach Fischer et al. [2001] und Tidden [2003]¹

Komponente	Cellulose [%]	Hemicellulose [%]	Lignin [%]	Stärke ¹ [%]	Fette ¹ [%]	Proteine ¹ [%]
Gras	26,5	10,2	28,4			
Laub	15,3	10,5	43,8			
Astwerk	35,4	18,4	32,6			
Küchenabfälle	19,4 ¹ - 50,8	6,7 - 19,1 ¹	9,9	51,8 ^a		
Bioabfall	25,3 ¹	9,7 ¹	15,1 ¹	33	9,0	7,9
Hausmüll	28,2 - 51,2	5,9 ¹ - 11,9	14,5 - 23,1	25	3,0	8,0

^ainkl. Fett- und Proteinanteil

Bei der Einteilung der Stoffgruppen ist zu beachten, dass die chemische Struktur der Kohlenhydratpolymere in verschiedenen Pflanzenteilen Unterschiede aufweist. So sind beispielsweise Hemicellulosen im Blatt in der Regel besser verdaulich als Hemicellulosen in Stengeln. Als weiterer Grund der schlechteren Verdaulichkeit der Hemicellulosen in Stengeln wird der höhere Ligningehalt angegeben [Hirst et al., 1959]. Daughtry et al. [1978] geben den Abbaugrad der Hemicellulosen im Pansen aus Blättern mit 63 - 69 % und aus Stengeln mit 53 - 63 % an. Mit zunehmendem Alter pflanzlicher Zellen erfolgt eine Inkrustation von Lignin in der Zellwand, die zusätzliche mechanische Festigkeit liefert [Mundhenke, 2002; Gharpuray et al., 1983]. Durch den physikalischen Verbund aus Lignin und Cellulose wird ein chemischer und enzymatischer Angriff erschwert, was zu einer reduzierten Abbaugeschwindigkeit führt [Tidden, 2003].

Auch Wyman [1996] verweist auf diverse Studien, die einen deutlichen Zusammenhang der Abbaubarkeit mit den externen und internen Oberflächen nachweisen, die einem enzymatischen Abbau zur Verfügung stehen. Während die externen Oberflächen von der Korngröße und der grundsätzlichen Beschaffenheit der organischen Fraktion abhängen, können insbesondere die internen Oberflächen durch Quellvorgänge mit Wasser oder anderen polaren Lösungsmitteln extrem vergrößert werden. Wyman [1996] beschreibt diese Vorgänge für Lignocellulosen und weist zudem darauf hin, dass Trocknungsprozesse die angreifbare – insbesondere innere – Oberfläche drastisch und irreversibel verringern können. Den genannten Schwellungsvorgängen, die zu einer Vergrößerung des internen Porenraumes führen, können Ligninikrustierungen entgegen wirken [Taherzadeh und Karimi, 2008].

Es kann angenommen werden, dass eine Vorbehandlung in wässriger Phase unter möglichst erhöhten Temperaturen diesen Quellvorgang erhöht bzw. beschleunigt und durch die hierdurch vergrößerte interne Oberfläche die Abbaubarkeit begünstigt. Diesen Umstand machen sich zahlreiche bereits untersuchte Vorbehandlungsverfahren zu Nutzen (s. Kapitel 4).

Bei der Vergärung organischer Abfälle – wie beispielsweise von Bioabfällen – ist die Hydrolyse von Lignocellulose oftmals der geschwindigkeitsbestimmende Schritt und trägt damit entscheidend zum Abbauverhalten und zur biochemischen Verfügbarkeit der nativ organischen Komponenten in einer biologischen Behandlung bei [Amon, 2006; Krieg, 2000; ATV, 1994; Radke, 2000].

Lignocellulose ist häufig ein wesentlicher – in manchen Abfallströmen sogar nahezu der einzige – Bestandteil in Abfällen aus unterschiedlichen Bereichen der Industrie, Wirtschaft und Haushalten. Dies gilt auch für eine Vielzahl von anderen nativ organischen Rückständen und Energiepflanzen [Taherzadeh und Karimi, 2008]. Die inherenten Eigenschaften nativer Lignocellulose bedingen eine deutliche Resistenz gegen enzymatische Angriffe und machen eine geeignete Vorbehandlung erforderlich, um einen enzymatischen Abbau zu ermöglichen. Der Erfolg einer Vorbehandlungsmethode für organische Stoffe hängt maßgeblich von der vorliegenden Art und Menge der Lignocellulosen und der Einbindung der Cellulose ab [ebd.].

3.2.3 Einfluss von Druckänderungen auf pflanzliche Zellen

Das im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersuchte Verfahren arbeitet mit in Bezug auf den Normaldruck deutlich veränderten Luftdrücken (bis 50 mbar_{absolut}) und kurzzeitigen Druckwechseln bzw. Druckstößen. Es ist daher relevant, inwieweit sich veränderte Drücke auf die Desintegration und damit auf den Aufschluss pflanzlicher

Zellen auswirken könnten.

Wie bereits im Kapitel 3.2.2 beschrieben, verfügen pflanzliche Zellen über eine erhebliche Stabilität und Widerstandskraft gegen verschiedene Formen von äußeren (Kraft-)Einwirkungen. Zur Überprüfung des Einflusses von Druck und insbesondere Unterdruck auf pflanzliche Zellen wurden Arbeiten aus dem Bereich der Botanik und Pflanzenphysiologie herangezogen.

Im Allgemeinen liegt der durch die Osmose bedingte hydrostatische Innendruck der Pflanzenzelle (Turgor) in einem Bereich von 5 - 15 bar. Es sind jedoch auch schon über 100 bar gemessen worden (z.B. bei bestimmten Halophyten). Die vollturgeszente Zelle (größtmöglicher Turgor der Zelle) ist – ähnlich wie ein aufgepumpter Gummireifen – strukturell enorm stabil [Schopfer, 2006].

Für gut gewässerte Pflanzenzellen gelten Turgor-Drücke im Bereich von 5 - 15 bar als normal. Nennenswerte Druckänderungen treten in der Zelle bereits bei natürlichen Vorgängen wie Transpiration und Wasseraufnahme auf [Tomos, 1988]. Tomos [2000] weist zusätzlich darauf hin, dass bei der Betrachtung des Elastizitätsmoduls von Zellen eine sogenannte „Stress-Härtung“ zu beobachten ist, in deren Verlauf der Wert des volumetrischen Elastizitätsmoduls ϵ mit zunehmendem Turgor steigt. Konkrete Angaben zu Belastungsgrenzen unterschiedlicher Pflanzenzellen hinsichtlich eines steigenden Turgors sind nur vereinzelt in der Literatur belegt. Benkert et al. [1997] führten Untersuchungen an Blütenzellen durch und konnten ein Platzen der Zellen bei ungefähr doppelten Turgor-Drücken (1,9 - 5,8 bar) feststellen. Die zuvor ermittelten stationären Turgor-Drücke lagen bei 1 - 4 bar. Die Autoren geben an, dass die Zellen sämtlich an der Spitze – im Bereich des größten Zellwachstums (Spitzenwachstum) – platzten.

Hüsken et al. [1978] führten Versuche zur Variation des Turgor-Drucks in höheren Pflanzenzellen durch, indem sie einzelne Pflanzenzellen mit einer Mikrokapillare (Mikrodrucksonde) punktierten und den Turgor-Druck der Zelle hierdurch direkt messen konnten. Die Zellen befanden sich während der Versuchsdurchführung in einer Nährlösung unter Normaldruck bei 20 °C. Der Turgor-Druck wurde durch Veränderung der Nährlösung und den dadurch hervorgerufenen Osmoseprozess im Bereich < 1 bis > 4 bar variiert, ohne dass die Zellen zerstört wurden. Zu ähnlichen Resultaten kommen Steudle et al. [1977], Büchner et al. [1981] und Zhu und Steudle [1991]. Tomos [2000] bestätigt abermals diese Ergebnisse und zitiert in einem Review mehrere Arbeiten, in denen dieser Zusammenhang ebenfalls beschrieben wird.

Tyree und Hammel [1972] führten Versuche zur Messung des Turgor-Drucks mit

Blattzellen in einer Druckkammer durch, in deren Verlauf sie bis zu 40 bar aufbrachten, ohne dass eine Zellzerstörung beobachtet wurde. Auch nach starken kurzfristigen Druckunterschieden – berichtet wird von Druckerhöhungsschritten um bis zu 27 bar und Verringerungsschritten um bis zu 4 bar – stellten sich nach entsprechenden Zeitintervallen Gleichgewichtsbedingungen zwischen Druck und Zellvolumen ein. Zu ähnlichen Ergebnissen kamen bereits Scholander et al. [1964].

Ein Ansteigen des Turgors um 1 bar entspricht hinsichtlich der auf die Zellwand wirkenden Kräfte einem außen anliegenden Unterdruck von -1 bar. Der Turgor ist numerisch ebenso groß wie der mechanische Dehnungsstress in der Zellwand [Schopfer, 2006]. Für die elastische Verformung der Zelle durch Wasseraufnahme gilt im Prinzip das Hookesche Gesetz, d.h. die relative Volumenänderung ($\Delta V/V$) erzeugt eine proportionale Druckänderung (Gleichung 3.1).

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{1}{\epsilon} \Delta P \quad (3.1)$$

Der volumetrische Elastizitätsmodul ϵ ist eine Materialeigenschaft, welche die Steifigkeit der Zellwand charakterisiert. Der Wert von ϵ hängt vom Zellvolumen und vom Turgor ab und ist daher eine experimentell schwer zu handhabende Größe, die in turgeszenten Zellen krautiger Pflanzen laut Schopfer [2006] meist im Bereich von 10 - 200 bar liegt.

Die über die Variation des Turgors hervorgerufenen Druckänderungen und die hierdurch wirkenden Kräfte veranschaulichen, dass eine alleinige Verminderung des Außendrucks (reine Vakuumbehandlung) keinen nennenswerten Einfluss auf einen zellulären Aufschluss haben kann. Gleiches gilt auch für einen anliegenden Überdruck, sofern nicht extreme Druckunterschiede (1.000 - 10.000 bar) wirken (s.u.).

Auch unter Berücksichtigung der Abhängigkeiten der Resistenz gegen Druckänderungen von Art, Alter und Wassersättigung der betreffenden Pflanzenzellen, kann davon ausgegangen werden, dass eine desintegrierende Wirkung von Druckänderungen in einer Größenordnung von wenigen bar auszuschließen ist. Es ist weiterhin zu berücksichtigen, dass bei Verfahren, die auf hydrostatischer Druckänderung beruhen, keine Scherkräfte wirken, da der Druck bzw. Unterdruck von allen Seiten wirkt [Heinz et al., 1998]. Die Kraft zum Bersten einer Zelle und die prozentuale Verformung sind zudem unter natürlichen Bedingungen keine rein zellinhärente Eigenschaften, die lediglich von der Zusammensetzung und Struktur einzelner Zellwände, sondern vom Verhalten des Zusammenschlusses einer Vielzahl von Zellen abhängt [Wang et al., 2004].

In der Hochdruckprozesstechnik im Bereich der Bio- und Lebensmitteltechnologie ermöglicht der Einsatz hoher Drücke im Bereich von 1.000 bis 10.000 bar die Schaffung völlig neuer funktioneller Eigenschaften und Strukturen von Biomaterie aufgrund druckinduzierter Modifikationen von inter- und intramolekularen Wechselwirkungen. Dies gilt insbesondere für nicht kovalente Bindungen (z.B. Denaturierung oder Modifikation von Proteinen Beeinflussung der Eigenschaften polymerer Kohlenhydrate) [Werner, 2007; Scheibenzuber, 2002]. Für Vorbehandlungsverfahren von Abfällen, Abwässern und Biomassen vor der Vergärung spielen derartige Prozesse unter extremen Drücken aufgrund des apparativen und energetischen Aufwandes keine Rolle.

Die aus Forschung und Technik bekannten Druckbehandlungsverfahren zur Vorbehandlung organischer Stoffe vor einem weitergehenden biologischen Abbau arbeiten alle in einem Bereich deutlich unter 1.000 bar, werden verfahrenstechnisch jedoch mit weiteren physikalischen Einflussgrößen (meist Temperatur und/oder mechanische Kräfte) kombiniert. Auch das im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersuchte Verfahren arbeitet mit einer Kombination verschiedener Wirkparameter (vgl. Kapitel 4.5 und 4.4.6).

3.3 Verfahrenstechnik der Vergärung

Die technische Umsetzung der Vergärung und Biogasgewinnung orientiert sich zwangsläufig an den biologischen Grundlagen des anaeroben Vergärungsprozesses. Dabei kommen in Abhängigkeit der Eigenschaften der eingesetzten Substrate, verschiedene Technologien zum Einsatz. Trotzdem gibt es einen grundsätzlichen Verfahrensablauf, sodass sich alle Biogasanlagen hinsichtlich ihres systemtechnischen Aufbaus ähneln.

Eine Biogasanlage unterteilt sich in vier verfahrenstechnische Prozessstufen. In der ersten Stufe wird das Substrat bereitgestellt, gelagert, je nach Anforderungen aufbereitet und in den Fermenter eingebracht. Als zweite Stufe folgt jeweils der eigentliche anaerobe Vergärungsprozess im Fermenter. Die dritte Stufe beinhaltet die Gasaufbereitung und die Gasnutzung. Als vierte Stufe, quasi parallel zur dritten, folgt die Lagerung, Verwertung und/oder Nutzung der Gärreste. Die Abbildung 3.5 zeigt den Verlauf und die Zusammenhänge der vier Prozessstufen und die dabei jeweils ablaufenden verfahrenstechnischen Vorgänge.

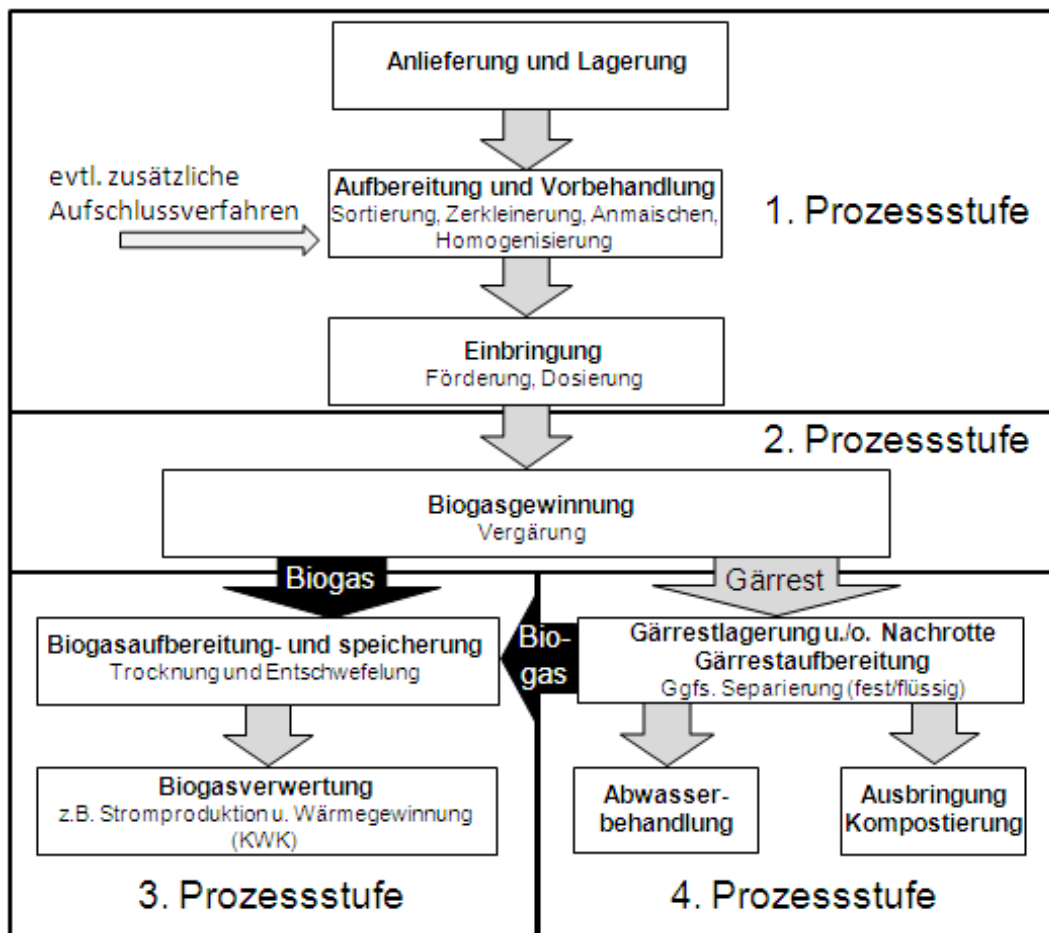


Abbildung 3.5: Allgemeiner Verfahrensablauf bei der Biogasgewinnung, nach Rame-sohl und Arnold [2006]; verändert

Der **Lagerung** zu Beginn des Behandlungsprozesses kommt insbesondere auf Anlagen zur Verarbeitung temporär anfallender Rohstoffe, wie z.B. nachwachsender Rohstoffe, gesteigerte Bedeutung zu, da diese Art von Substraten in der Regel nur ein- oder zweimal pro Jahr geerntet wird, jedoch für den Betrieb der Biogasanlage betriebstätig zur Verfügung stehen muss. Die Gestaltung der Lager ist grundsätzlich von den verwendeten Substraten abhängig.

Art und Umfang der **Substrataufbereitung** beeinflussen den Ablauf des Gärprozesses und damit die Ausnutzung des energetischen Potenziales der verwendeten Substrate. Ziel der Aufbereitung muss es sein, auf der einen Seite gesetzlichen bzw. anderweitigen qualitativen Ansprüchen (im Falle von Abfällen: z.B. geforderte Abbaugrade, Hygienisierung) und auf der anderen Seite den Mikroorganismen als Erzeuger des Methans weitestgehend gerecht zu werden. In der Substrataufbereitung

liegt eines der beiden großen Potenziale der Optimierung der Gesamtanlage [Ramesohl und Arnold, 2005; Wallmann und Fricke, 2002].

Die Notwendigkeit und technische Ausgestaltung einer **Sortierung** hängt von der Zusammensetzung und Herkunft der verwendeten Substrate ab. Diese ist insbesondere relevant für Bio- und Restabfälle, die im Allgemeinen das größte Störstoffpotenzial aufweisen.

Wenn im Prozessverlauf keine **Hygienisierung** des Gärsubstrates erreicht werden kann (mind. 24 h, $> 55\text{ °C}$), muss diese aufgrund der gesetzlichen vorgeschriebenen Kriterien anderweitig sichergestellt werden. In solchen Fällen ist eine thermische Vor- oder Nachbehandlung zu integrieren. Die Behandlung erfolgt durch Erwärmung der Stoffe auf eine Temperatur von 70 °C bei mindestens einer Stunde Verweilzeit. Die Hygienisierung wird in der Regel vor der Einbringung bedenklicher Kosubstrate bei der Vergärung nachwachsender Rohstoffe durchgeführt. Die Organik wird im Falle einer dem Vergärungsprozess vorgelagerten Hygienisierung zum Teil thermisch aufgeschlossen und ist dadurch besser vergärbar.

Die **Substratzerkleinerung** erschließt Substratoberflächen für den biologischen Abbau. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass mit einem höheren Zerkleinerungsgrad die Geschwindigkeit des biologischen Abbaus steigt, aber nicht zwingend die Gasausbeute [Ramesohl und Arnold, 2005](vgl. auch Kapitel 4.4).

Insbesondere in der Nassvergärung, aber auch in der Trockenvergärung, kann eine vorhergehende **Anmaischung und Homogenisierung** erforderlich werden, um den erforderlichen Wassergehalt einzustellen und – soweit erforderlich – Animpfmateriel (z.B. Gülle, Prozesswasser) zuzugeben.

Die Homogenität der zugeführten Substrate ist für die Stabilität des Vergärungsprozesses von hoher Bedeutung. Bei stark schwankender Belastung und wechselnder Substratzusammensetzung müssen die Mikroorganismen sich an die veränderten Bedingungen anpassen, was meist mit einer Einbuße bei der Gasausbeute verbunden ist.

3.3.1 Prozessparameter und -bedingungen

Wie im Kapitel 3.1.2 erläutert, wird Biogas durch Mikroorganismen in einer anaeroben Stoffwechselkette gebildet. Daher muss bei der Betrachtung der Biogasgewinnung berücksichtigt werden, dass der Erfolg des Einsatzes von Anaerobverfahren von der Lebenstätigkeit der beteiligten Mikroorganismen abhängt und damit gewährleistet werden muss, dass diesen Mikroorganismen möglichst günstige Lebensbedingungen geboten werden. Für eine Steigerung der Effizienz des Anaerobprozesses können über

den gesamten Bereich der Verfahrenskette Optimierungen vorgenommen werden.

Im Weiteren soll auf Parameter eingegangen werden, die sich auf die Effizienz des Substratabbaus im Fermenter auswirken. Auch hier erstrecken sich die Einflussfaktoren von der Substratqualität über die Substrataufbereitung, den Zusatz von Prozesshilfsstoffen bis hin zur Prozessführung und weiteren Parametern (Abbildung 3.6).

Auf einige wesentliche Parameter wird an dieser Stelle genauer eingegangen.

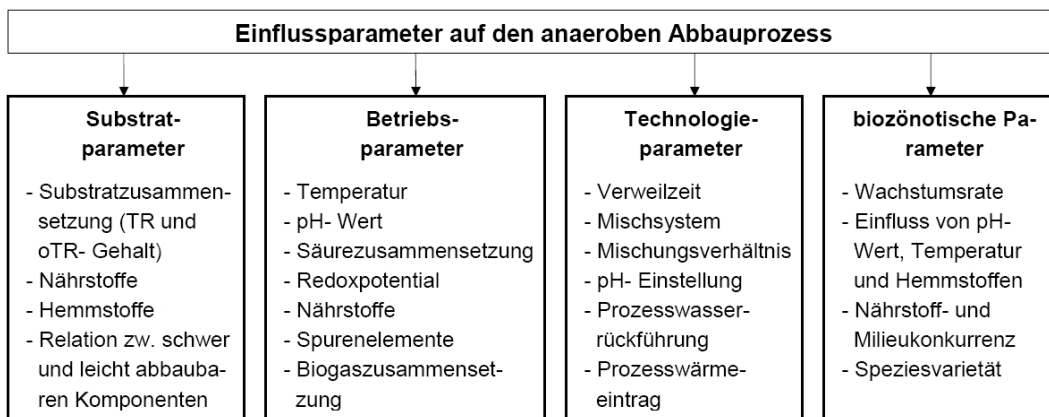


Abbildung 3.6: Einflussparameter auf den anaeroben Abbauprozess, nach Bekker [2007]; verändert

Prozesstemperatur

Die Temperatur, bei der (bio)chemische Reaktionen ablaufen, hat direkten Einfluss auf die Reaktionsgeschwindigkeit. Eine Erhöhung der Reaktionstemperatur um 10 K bedingt einen Anstieg der Reaktionsgeschwindigkeit um den Faktor zwei bis vier [Riedel, 2004]. Bei biologischen Prozessen stehen der Steigerung der Reaktionsgeschwindigkeit mit steigender Temperatur jedoch Denaturierungserscheinungen der Proteine entgegen. Hieraus resultiert nach Überschreitung einer spezifischen Temperatur zunächst ein Abfallen der Stoffwechselleistung, das zu einem vollständigen Zusammenbruch des Stoffwechselprozesses führen kann.

Zur Kennzeichnung der bakteriellen Temperaturaffinität werden die Temperaturbereiche psychrophil ($< 20\text{ }^{\circ}\text{C}$), mesophil (um $35\text{ }^{\circ}\text{C}$) und thermophil (um $55\text{ }^{\circ}\text{C}$) gewählt. Technisch relevant sind mesophile und thermophile Prozesse, wobei Erstere den Vorteil eines breiten Populationsspektrums zur Anpassung an veränderte Betriebsbedingungen haben, aufgrund ihrer geringeren Wachstumsrate jedoch längere Adaptionszeiten benötigen [Langhans, 1999; Kroiss und Svardal, 2005].

Thermophile Spezies sind Spezialisten mit geringer Populationsbreite, aber kurzer Adaptionszeiten in Folge größerer Wachstumsgeschwindigkeiten. Sie haben den Vorteil, dass energetisch hochwertige Substrate (wie Fette) in diesem Temperaturbereich besser verfügbar sind [Langhans, 1999]. Thermophile Bakterien weisen aufgrund der höheren Prozesstemperatur, eine höhere Aktivität in der hydrolytischen und acetogenen Phase auf, was zu höheren Gasausbeuten führt. In der Literatur wird zum Teil von geringeren Methangehalten thermophil erzeugten Biogases berichtet [Ahn und Forster, 2002; Gallert und Winter, 1997]. Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass mit steigender Temperatur der Kohlendioxidanteil des Biogases zunimmt, da die Löslichkeit der Gaskomponenten unter wärmeren Bedingungen abnimmt [Tid-den, 2003].

Ein Vorteil des anaeroben Abbaus im thermophilen Bereich ist die Abtötung gesundheitsschädlicher Keime. Nachteilig ist jedoch die erhöhte notwendige Energiezufuhr zum Erreichen der erwünschten Prozesstemperatur bei der thermophilen Prozessführung, welche sich negativ auf die Gesamtenergiebilanz auswirkt, sofern nicht überschüssige Abwärme in ausreichendem Umfang verfügbar ist [Fricke et al., 2005; Schattauer und Weiland, 2006b; Santen, 2007; Voß, 2006].

Zu beachten ist, dass die Prozesstemperatur auch unmittelbar auf chemische Reaktionsparameter wie Dissoziation und Reaktionsgeschwindigkeiten wirkt und ebenso physikalische Größen wie Diffusionsgeschwindigkeiten und Löslichkeiten beeinflusst. Damit beeinflusst die Temperatur neben der direkten physiologischen Wirkung die Verfügbarkeit von Substraten, den Stofftransport sowie die Toxizität (z.B. durch NH_3) [Koster und Koomen, 1988; Kroiss und Svardal, 2005].

Aufgrund des breiteren Populationsspektrums und der allgemein stabileren Prozessführung wurden die Gärversuche der vorliegenden Arbeit im mesophilen Bereich durchgeführt.

pH-Wert

Ebenso wie die Temperatur ist der anaerobe Abbau organischer Substanz vom pH-Wert abhängig. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich der pH-Wert auf die mikrobielle Aktivität der Mikroorganismen auswirkt, indem die Enzymaktivität sowie die Ladung der Substrate und Produkte beeinflusst werden. Des Weiteren bestimmt der pH-Wert das Dissoziationsgleichgewicht der gelösten Komponenten Kohlendioxid, Ammoniak, Schwefelwasserstoff und der organischen Säuren (Abbildung 3.7).

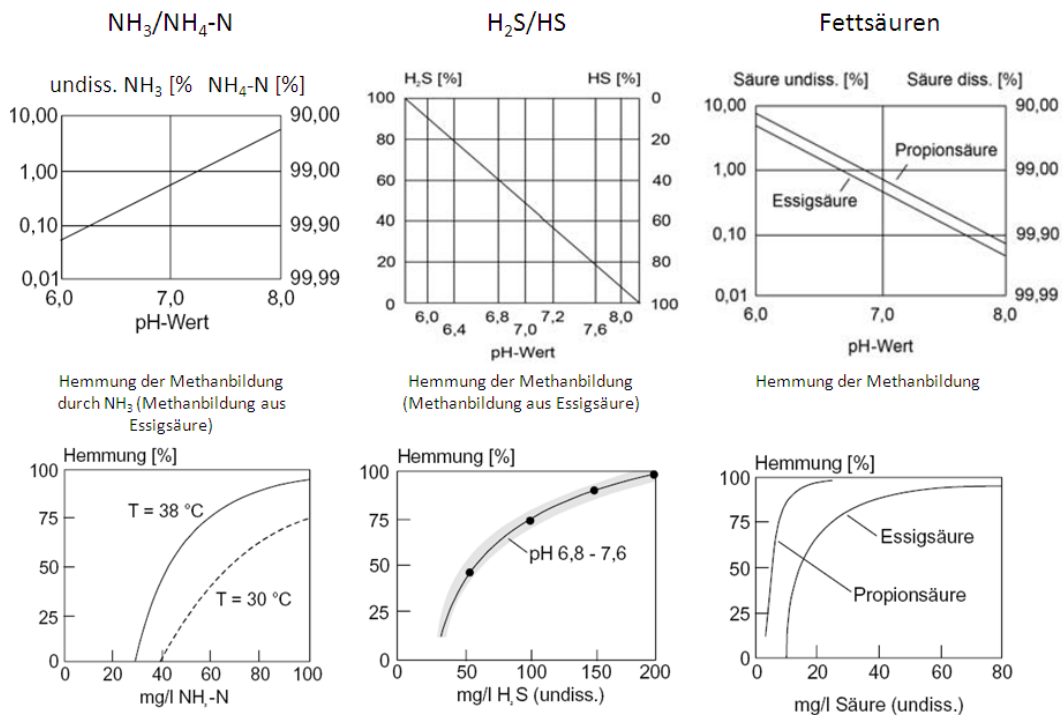


Abbildung 3.7: Dissoziationsgleichgewichte von NH₃/NH₄-N, H₂S/HS und Fettsäuren sowie dadurch hervorgerufene Hemmungen, nach Weiland [2003]; verändert

Die Mikroorganismen können die jeweiligen Substanzen nur in undissoziierter Form aufnehmen. Aus der Abbildung 3.7 geht hervor, dass bei einem abnehmenden pH-Wert zunehmend Schwefelwasserstoff (H₂S) und organische Säuren undissoziiert vorliegen und sich somit hemmend auf den Prozess auswirken können. Im Gegensatz dazu ist bis zu einem pH-Wert von 7,0 mit einer Hemmung, infolge des zunehmenden undissoziierten Ammoniaks, zu rechnen. Ferner ist die Art der in der acetogenen Phase gebildeten organischen Säure vom pH-Wert abhängig. Je niedriger der pH-Wert, desto weniger kurzkettige organischen Säuren (Essigsäure) und umso mehr langkettige Fettsäuren, wie Butter- und Propionsäure, werden gebildet. Der unterschiedliche Aufbau der benannten organischen Säuren wirkt sich auf deren weiteres Abbauverhalten aus, da die längerkettigen Butter- und Propionsäure zunächst in die kurzkettige Essigsäure abgebaut werden müssen. Die an den verschiedenen Phasen des anaeroben Abbaus beteiligten Mikroorganismen bevorzugen unterschiedliche pH-Werte. Die pH-Optima liegen für die hydrolisierenden und acidogenen Mikroorganismen bei 4,50 - 6,30 und für die acetogenen und methanogenen Bakterien bei 6,80 - 7,20 [Oechsner und Lemmer, 2009; Wellinger, 1991; Schattauer und Weiland, 2006b]. Die Stoffwechselaktivität der hydrolysierenden und acetoge-

nen Mikroorganismen wird infolge erhöhter pH-Werte nur geringfügig gehemmt. Im Gegensatz dazu sind die methanogenen Mikroorganismen wesentlich anfälliger gegenüber pH-Werten außerhalb des angegebenen Bereiches [Kroiss und Svardal, 2005; Schattauer und Weiland, 2006b]. Im Normalfall wird der pH-Wert durch freigesetztes Kohlendioxid gepuffert. Falls der pH-Wert durch erschöpfte Pufferkapazität sinkt, werden die Methanbakterien in ihrer Stoffwechselaktivität gehemmt [Schattauer und Weiland, 2006b].

Hemmende und toxische Einflussgrößen

Es existieren zahlreiche hemmende und toxische Einflussgrößen und Substanzen für den anaeroben Abbauprozess. Die möglichen inhibierenden Bedingungen für den anaeroben Abbau sind mannigfaltig und variieren je nach eingesetztem Substrat und technologischer Umsetzung. Die Festlegung exakter Grenzkonzentrationen ist nicht möglich, da bei einigen Stoffen nur die undissoziierte Form hemmend wirkt und die Lage des Dissoziationsgleichgewichts von den Prozessbedingungen beeinflusst wird. Einen Überblick über wichtige und häufig auftretende hemmende und toxische Einflussgrößen zeigt die Tabelle 3.4.

Die anaerobe Biozönose ist in der Lage sich an steigende Konzentrationen potenziell hemmender Substanzen zu adaptieren. Aus diesen Gründen wird an dieser Stelle auf eine ausführliche Diskussion derartiger Einflussgrößen verzichtet.

Tabelle 3.4: Hemmende und toxische Einflussgrößen auf den anaeroben Abbau, nach [Weiland, 2003], verändert

Hemmstoff	Hemmkonz.	Anmerkung
Sauerstoff	> 0,1 mg/lO ₂	Hemmung der obligat anaeroben Methanbakterien; Rest-O ₂ im Substrat bzw. kurzer Lufteintritt bei Öffnung des Reaktors akzeptabel
Schwefelwasserstoff	> 50 mg /l H ₂ S	Hemmwirkung steigt mit sinkendem pH-Wert
organische Säuren (flüchtige Fettsäuren)	> 2.000 mg/l HAc (bei pH = 7)	Hemmwirkung steigt mit sinkendem pH-Wert. Hohe Adaptionfähigkeit der Bakterien
Ammonium-Stickstoff (NH ₄ -N)	> 4.000 - 6.000 mg/l NH ₄ (bei pH 7)	Hemmwirkung steigt mit steigendem pH-Wert. Hohe Adaptionfähigkeit der Bakterien.
Ammoniak	> 150 mg/l ^a	Wechselwirkung mit Calcium und Natrium
Magnesium	> 2.400 mg/l ^a	Wechselwirkung mit organischen Säuren
Schwermetalle		Nur gelöste Metalle wirken inhibierend/toxisch. Entgiftung durch Sulfidfällung.
Kupfer	> 50 mg/l	
Zink	> 150 mg/l; > 400 mg/l ^a	
Chrom	> 100 mg/l; > 130 mg/l ^a	
Nickel	> 10 mg/l ^a	
Blei	> 340 mg/l ^a	
Salze	> 10 g/l Chlorid ^b	Hohe Adaptionfähigkeit der Bakterien
Wasserstoff	> ca. 1 µMol ^b (≈1,3 g/l im Gas)	Für Propionsäureabbau mgl. niedrige Konzentrationen erwünscht.
Kohlensäure	1 bar CO ₂ -Partialdruck ^b	Kritisch für Propionatabbau.
Desinfektionsmittel, Antibiotika, Reinigungsmittel	k.A.	Hemmwirkung produktspezifisch

^a[Scholwin et al., 2009], ^b[ATV, 1993]

3.3.2 Vergärungsverfahren

Einteilung der Vergärungsverfahren

Grundsätzlich können Vergärungsverfahren nach unterschiedlichen Verfahrensmerkmalen charakterisiert werden. Die wesentlichen Merkmale sind in der Abbildung 3.8 aufgeführt.

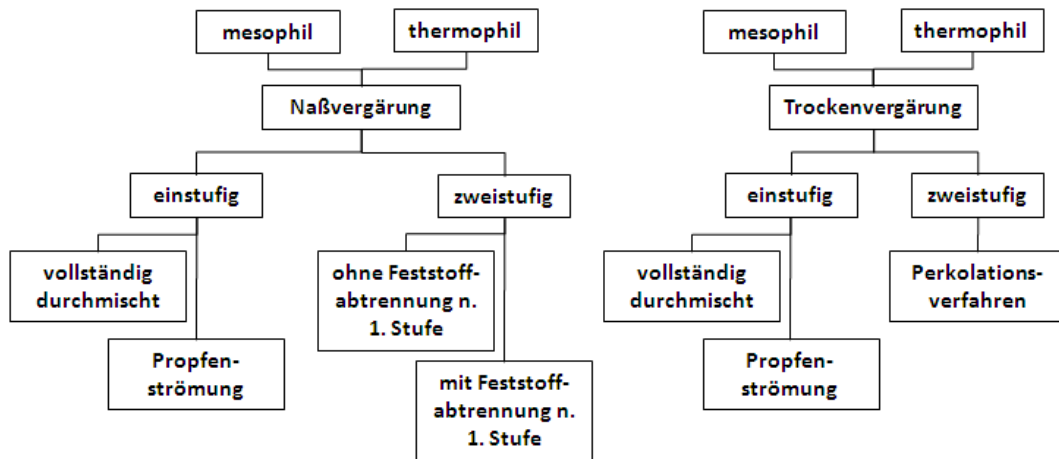


Abbildung 3.8: Einteilung der Vergärungsverfahren nach deren Prozessführung

Die Unterscheidung nach der Betriebstemperatur ist im Hinblick auf die energetische Optimierung des Verfahrens von Bedeutung. Thermophil betriebene Vergärungsverfahren erreichen aufgrund der höheren Umsatzrate der Methanbakterienstämme höhere Gasausbeuten als mesophile Verfahren [Kroiss und Svardal, 2005; Gallert und Winter, 1997; Gannoun et al., 2009]. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass teilweise geringere Methankonzentrationen beobachtet wurden (vgl. 3.3.1).

Thermophile Prozesse benötigen eine erhöhte Zufuhr von Wärmeenergie, da im Verlauf des anaeroben Abbaus nur wenig Wärmeenergie freigesetzt wird. Die zu wählende Prozesstemperatur ist im Einzelfall nach Energiebedarf und potenziell zusätzlicher Energiegewinne abzuwägen. Wird das zu vergärende Substrat unter erhöhten Temperaturen vorbehandelt – wie dies auch für das im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersuchte Verfahren gilt – kann ein nachfolgender thermophiler Anaerobprozess sinnvoll sein, da das Substrat nicht mehr zusätzlich vorerwärmt werden muss.

Eine Einteilung der Vergärungsverfahren kann weiterhin nach kontinuierlichen und diskontinuierlichen Verfahren vorgenommen werden. Diskontinuierliche Verfahren zeichnen sich dadurch aus, dass das gesamte Gärsubstrat zu einem Zeitpunkt in den Fermenter ein- und ausgetragen wird. Aufgrund der einheitlichen Verweildauer

des Substrates können Kurzschlussströmungen ausgeschlossen werden. Ein Nachteil ist die sich – aufgrund der unterschiedlichen Abbauphasen (vgl. Kapitel 3.1.2) – verändernde Qualität und Quantität des gebildeten Biogases. Großtechnisch wird diesem Umstand in der Regel durch die Zusammenschaltung mehrerer kleinerer Fermenter begegnet, die zeitlich versetzt betrieben werden.

Störungen des anaeroben Abbaus bis hin zum Zusammenbruch der Biozönose führen in der Regel nicht zu Totalausfällen der Anlage, da weiterhin Behandlungskapazität in anderen Fermentern und Impfsupstrat für eine zügige Wiederinbetriebnahme einzelner Fermenter zur Verfügung stehen.

Hauptvorteil eines kontinuierlichen Prozesses ist – weitgehend homogenen Substrateintrag vorausgesetzt – ein quantitativ und qualitativ gleich bleibender Gasertrag. Von Nachteil – insbesondere bei nicht optimaler Betriebsweise – ist die Gefahr, dass sich limitierende Faktoren/Substanzen im Prozess anreichern können. Gerade bei Substraten mit einer geringen Bandbreite organischer Stoffe (Monochargen) werden nicht optimal an das Substrat angepasste Mikroorganismen aus der Biozönose verdrängt und ausgewaschen.

Tabelle 3.5: Rückhalt und Rückführung von Biomasse [ATV, 1990]

Verfahrenstechnik	Biomassekonzentrationsverhältnis im Reaktor	Biomasseanreicherung, -abtrennung	Biomassewachstum
Ausschwemmreaktor	geringe Unterschiede	ohne	suspendiert
Pfropfstromreaktor	geringe Unterschiede	externe Abtrennung u. Rückführung	suspendiert, oberflächenfixiert
Kontaktreaktor (anaerobes Belevungsverfahren)	geringer Gradient angestrebt	externe Abtrennung u. Rückführung	suspendiert
Schlammbedreaktor	ausgeprägter Konzentrationsgradient	interne Abtrennung u. Rückführung, Aggregation, Abscheidung aggregierten Schlammes ebenfalls integriert	suspendiert, Pellets (aggregierter Schlamm)
Festbedreaktor	stark unterschiedlich	Aufwuchs auf unbeweglichem Trägermaterial	oberflächenfixiert, suspendiert (im Idealfall untergeordnet)
Schwebelbed- und Wirbelbedreaktor	geringe Unterschiede	Aufwuchs auf beweglichem Trägermaterial Abtrennung und Rückführung in- und extern	oberflächenfixiert suspendiert (untergeordnet)

Eine weitere Einteilung der Verfahren kann nach der Art des Rückhaltes aktiver Biomasse bzw. der Animpfung des zugeführten Substrates erfolgen (Tabelle 3.5).

Beim Rückhalt aktiver Biomasse wird zwischen Prozessen für flüssige und Prozessen für feststoffhaltige Substrate unterschieden. Nach Scholwin et al. [2009] wird bei flüssigen Substraten die aktive Biomasse im Fermenter am einfachsten dadurch erhöht, dass die ausgetragenen Bakterien sedimentiert und als Bakterien Schlamm (Rücklaufschlamm) wieder in den Fermenter zurückgeführt werden (sogenannte Kontaktreaktoren). Auch können sedimentierbare Bakterienagglomerate schon im Fermenter selbst zurückgehalten werden (UASB-Prozess, Upflow anaerobic sludge blanket). Eine andere Möglichkeit besteht darin, Materialien mit großer Oberfläche als Aufwuchsfläche für Bakterien in den Fermenter einzubringen (Trägerkörper-Verfahren). Ein derartiger Rückhalt ist bei Feststoffprozessen nicht möglich, da die Bakterienmasse nicht vom pastösen Gärgut abgeschieden werden kann. In diesem Fall kann eine bakterienreiche Fraktion des ausgegorenen Materials als Impfmateriale rückgeführt werden.

Die zweistufige und zweiphasige Vergärung

Zweistufig sind Verfahren, bei denen der anaerobe Abbau in zwei räumlich und/oder prozesstechnisch voneinander getrennten Abbaustufen erfolgt. In zweiphasigen Prozessen erfolgt eine Aufteilung in eine Fest- und eine Flüssigphase. In der Literatur werden die Begriffe zweiphasig und zweistufig zum Teil synonym verwendet.

Bei einstufigen Verfahren laufen alle Stufen des anaeroben Abbaus in einem Reaktor ab. Wie in der Abbildung 3.8 ersichtlich, kann das Substrat den Reaktor hierbei vollständig durchmischt oder in einer Propfenströmung durchlaufen. Aufgrund der unterschiedlichen Milieuoptyma erfolgt in zweistufigen Verfahren in der Regel eine Trennung der Hydrolyse und Versäuerung von den nachfolgenden Prozessen der Acetogenese und Methanogenese. Dies kann höhere Abbauraten und eine stabilere Prozessführung ermöglichen [Weiland, 2001a; Langhans, 1999].

In der Tabelle 3.6 sind die Milieuoptyma der Hydrolyse und Acidogenese denen der Acetogenese und Methanogenese gegenübergestellt. Die Unterschiede gelten insbesondere hinsichtlich des pH-Wertes (vgl. Kapitel 3.3.1, pH-Wert) und des Redox-Potenzials.

Tabelle 3.6: Milieuoptyma bei Hydrolyse und Acidogenese sowie Acetogenese und Methanogenese [Weiland, 2001a]

Parameter	Hydrolyse & Acidogenese	Acetogenese & Methanogenese
Temperatur [°C]	25 - 30	32 - 42; 50 - 58
pH Wert []	5,2 - 6,3	6,7 - 7,5
C/N - Verhältnis	10/1 - 45/1	20/1 - 30/1
Feststoffgehalt [TS]	< 40 %	< 30 %
Redox-Potential [mV]	+ 400 bis - 300 (fakultativ anaerob)	< - 250 (obligat anaerob)
Nährstoffbedarf C/N/P/S	500/15/5/3	600/15/5/3
Spurenelemente	keine spez. Ansprüche	Ni, Co, Mo, Se

Nach Tidden [2003] und Langhans [1999] werden im Wesentlichen folgende Zielsetzungen mit zweistufigen Verfahren verfolgt:

- Erhöhung der Biogasausbeute,
- Minimierung der Reaktorvolumina,
- Erhöhung der Prozessstabilität,
- weitergehende Hydrolyse und verbesserter Zellaufschluss,
- Erzeugung eines feststoffarmen, gelöst-organisch hochbelasteten Hydrolysates,
- Milieuentgiftung durch Abbau potenziell biotoxischer Substanzen und
- Bereitstellung einer leicht verwertbaren Kohlenstoffquelle für einen Denitrifikationsprozess.

Laut Langhans [1999] liegen Erfahrungen aus dem Betrieb großtechnischer Anlagen mit separater Hydrolysestufe vor, die erzielte Erhöhungen des gelösten CSB in Form von niederen Carbonsäuren und anderen hydrolytischen Spaltprodukten um etwa den Faktor 10 gegenüber den Eingangskonzentrationen und damit den potenziellen Nutzen dieser Prozessführung zeigen. Er verweist jedoch darauf, dass es gerade bei der Abfallvergärung und Co-Fermentation mit vertretbarem technologischen sowie regelungstechnischem Aufwand nicht möglich ist, den Prozess stabil im

angestrebten Optimum zu fahren, da die Substratzusammensetzung (Versäuerungspotenzial), das Puffersystem (pH), die Temperatur und die hydraulische Verweilzeit sich ständig ändern können.

Insbesondere bei kohlenhydrat- und eiweißreichen Gärsubstraten kann eine separate Hydrolysestufe jedoch zur Stabilisierung der Methanstufe beitragen, indem die Populationsdynamik der Hydrolyse von ihr ferngehalten wird. Mit entsprechender Hydrolysatdosierung läßt sich die Säurebelastung der Methanisierung regeln und im Optimum halten. Allerdings ist dafür ein entsprechender Dosierpuffer bzw. eine pH-Regelung erforderlich [Langhans, 1999]. Die Summe der hydraulischen Verweilzeiten von Hydrolyse und Methanisierung kann dann theoretisch kleiner als die eines Einstufenprozesses sein. Insbesondere bei Dosierung eines feststoffentlasteten Hydrolysatwassers in eine Methanisierung mit Bakterienimmobilisierung ist dieser Effekt deutlich. Der notwendige Aufwand und die erzielbare Wirkung sind jedoch im Einzelfall zu prüfen [ebd.].

Der zweistufige Prozess kann sowohl mit als auch ohne Phasentrennung erfolgen. Ohne Phasentrennung durchläuft das gesamte Substratgemisch beide Prozessstufen. Bei Phasentrennung erfolgt diese durch geeignete Aggregate nach der ersten Stufe. Nur die mit organischen Säuren angereicherte Flüssigphase gelangt dann in die zweite Prozessstufe.

Wesentliche Merkmale der zweiphasigen Vergärungsverfahren sind eine Fest-Flüssig-Trennung der Substratsuspension aus einer Vorbehandlung oder des Hydrolysats einer Hydrolysestufe sowie die getrennte Weiterbehandlung der beiden Phasen.

Das Ziel einer zweiphasigen Prozessführung ist es, die Behandlungszeit im Vergleich zu einphasigen Verfahren zu verkürzen und bei geringeren Reaktorvolumina hohe Raum-Zeit-Ausbeuten zu erzielen [Tidden, 2003]. Bei der prozesstechnisch getrennte Behandlung der Feststoffe und der Flüssigphase wird die Feststoffverweilzeit von der hydraulischen Verweilzeit entkoppelt. Auch bei kurzen hydraulischen Verweilzeiten können so ausreichend lange Verweilzeiten der Festphase für eine hohe Hydrolyseleistung erreicht werden. Die stark mit möglichst leicht abbaubarer Organik angereicherte und feststoffarme Flüssigphase kann in Hochleistungsreaktoren mit hoher spezifischer Raumbelastung unter Einhaltung kurzer Aufenthaltszeiten abgebaut und zu Biogas umgesetzt werden.

Geeignet sind hierzu Festbettreaktoren oder Hybrid-Reaktoren (z.B. UASB-Prinzip), die dann eingesetzt werden können, wenn eine Flüssigphase mit hohen gelösten CSB-Konzentrationen vorliegt [Mata-Alvarez et al., 2000; Tidden, 2003].

Ein Zweistufenprozess kann bei festen Substraten auch mit einem Zweiphasenprozess gekoppelt werden. Dann werden feste Abfälle in einer Hydrolysestufe hydrolysiert. Die säurehaltige Prozessflüssigkeit wird danach in einer Fest/Flüssig-Trennung von der festen Phase abgetrennt und separat methanisiert. Dadurch kann für die flüssige Phase ein Hochleistungsprozess mit erhöhter Biomassekonzentration eingesetzt werden, während die feste Phase bei schwach saurem pH in der Regel innerhalb von Stunden bzw. wenigen Tagen hydrolysiert wird [Weiland, 2001a; Santen, 2007; Tidden, 2003; Scholwin et al., 2009]. Für die Hydrolysestufe bestehen laut Edelmann [2001] verschiedene Optionen:

- Diskontinuierliche Beschickung mit Perkolation durch Kreislaufwassers.
- Kontinuierliche Beschickung und Hydrolyse in relativ flüssiger Phase durch Anmischen der Feststoffe mit Presswasser aus einer anschließenden Fest-Flüssig-Trennung.
- Perkolation in einer ständig durchmischten festen Phase, welche die Hydrolysestufe vorzugsweise propfstromartig durchläuft.

Trotz positiver Forschungsergebnisse sind zweistufigem zweiphasige Vergärungsverfahren bisher nur selten großtechnisch umgesetzt worden [Santen, 2007].

Ein Beispiel für eine großtechnische Umsetzung ist das sogenannte BTA®-Verfahren. Die Abfälle werden hier in einem Behälter (Pulper) suspendiert und anschließend nach einer oder mehreren Hydrolysestufen wieder entwässert. Feste, anaerob abbaubare Abfälle können bei diesem zweistufigen Ansatz in zwei bis vier Tagen weitgehend abgebaut werden. Allerdings ist zusätzlich zu den Hydrolysestufen nochmals ein – allerdings relativ kleiner – Hochleistungsreaktor zur Behandlung der flüssigen Phase notwendig; trotzdem ist das totale Fermentervolumen nur halb so groß wie das einer thermophilen einstufigen Anlage [Edelmann, 2001].

In dem von Santen [2007] untersuchten zweistufigen, zweiphasigen Perkulationsverfahren wird das Substrat nach einer mechanischen Aufbereitung in einem kontinuierlich betriebenen Perkolator quasi-kontinuierlich mit Prozesswasser bedüst und zyklisch druckbelüftet. Das mit Organik angereicherte Prozesswasser wird über einen Siebboden abgeführt und über einen Feststoffscheider einem anaeroben Hybrid-Fermenter (kombiniertes Schlamm- und Festbettverfahren) zur Biogasproduktion unter hohen Raumbelastungen zugeführt.

Beim Einsatz von Vergärungsreaktoren mit integriertem Festbett muss in der Regel eine effektive Feststoffabscheidung aus dem Prozesswasser vorgeschaltet werden [Fricke et al., 2006]. Sowohl die erforderliche Fest-Flüssig-Trennung und die weitgehende Feststoffabreicherung, als auch vorgeschaltete Schritte zu einem verbesserten Aufschluss der organischen Substrate bedingen einen hohen energetischen und maschinentechnischen Aufwand. Ob dieser Mehraufwand gegenüber konventionellen einphasigen Vergärungsverfahren gerechtfertigt ist, muss im Einzelfall geprüft werden.

Das in dieser Arbeit behandelte Verfahren zählt zu den Aufschlussverfahren vor dem Vergärungsprozess bzw. kann – abhängig von der Leistungsfähigkeit – als Teil einer von den weiteren Abbauschritten getrennt ablaufenden Hydolysestufe betrachtet werden. Aufgrund der integrierten Fest-Flüssig-Trennung ist die Vakuum-Siede-Extraktion daher ein Bestandteil zweistufiger Naßvergärungsverfahren mit Feststoffabtrennung nach der ersten Stufe.

Mit dem Verfahren der Vakuum-Siede-Extraktion als Verfahrensschritt eines zweiphasigen Vergärungsverfahrens, wird eine Erhöhung der – möglichst gelösten – organischen Fracht in einer abgetrennten Flüssigphase angestrebt (vgl. Kapitel 4.4.6). Die im Verlauf dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse ermöglichen die Beurteilung der energetischen und prozesstechnischen Eignung des neuartigen Verfahrensansatzes als Bestandteil eines Gesamtverfahrens zur anaeroben Behandlung organischer Substrate.

Kapitel 4

Vorbehandlungs- und Aufschlussverfahren

4.1 Einleitung

Um hinreichende enzymatische Abbauvorgänge bei der Produktion von Biogas oder auch Bioethanol zu erreichen, sind Vorbehandlungsverfahren meist unerlässlich. Effektive und ökonomische Vorbehandlungsverfahren sollten folgende Bedingungen erfüllen [Taherzadeh und Karimi, 2008]:

- Produktion reaktiver organischer Strukturen für den enzymatischen Angriff,
- Vermeidung der Bildung möglicher Inhibitoren für hydrolytische Enzyme und fermentative Mikroorganismen,
- minimaler Energieaufwand / hohe Energieeffizienz,
- geringe spezifische Betriebskosten,
- geringe Investitionskosten,
- geringe Mengen an Rückständen,
- kein oder möglichst geringer Bedarf kostengünstiger und nicht inhibierender zusätzlicher Betriebsstoffe (z.B. Chemikalien).

Im Bereich der Biogasproduktion liegen Ergebnisse zu Vorbehandlungsverfahren zahlreicher Forschungsvorhaben vor. Das Ziel eines Vorbehandlungs- und Aufschlussverfahrens für Biogas produzierende Verfahren liegt – neben der Störstoffentfrachtung und Homogenisierung – in der Erhöhung der Zugänglichkeit der relevanten Enzyme

zum abzubauenen Substrat und damit in einer Erhöhung der erzielbaren Biogaserträge.

Bei der Auswahl der Aufbereitungstechnik für biogene Rest- und Abfallstoffe ist insbesondere die Zusammensetzung der Ausgangssubstrate entscheidend. Bioabfälle zeichnen sich beispielsweise durch stark unterschiedliche stoffliche Zusammensetzungen, physikalische Eigenschaften und Schadstoffpotenziale aus. Sie erfordern somit umfangreichere oder zumindest andere Aufbereitungsmaßnahmen, als dies beispielsweise für kommunale Abwässer der Fall ist. Neben Anforderungen hinsichtlich der Funktionalität und Betriebsstabilität ist eine möglichst einheitliche und gleichbleibende Zusammensetzung des Eingangssubstrates ebenso erforderlich, wie ein hoher Anteil anaerob verfügbarer organischer Bestandteile. Die Aufarbeitung von Bioabfällen, aber auch organischer, gewerblicher oder landwirtschaftlicher Abfälle erfolgt in der Regel durch eine mechanische und bei anschließender Nassvergärung durch eine Kombination trocken und nass arbeitender Aufbereitungstechniken. Die in den meisten Fällen eingesetzten grundlegenden Aufbereitungstechniken können dabei nach Tidden [2003] in folgende Behandlungsschritte unterteilt werden:

- Vorabtrennung grober Störstoffe,
- Vorzerkleinerung / Absiebung,
- manuelle oder automatisierte Abtrennung von Störstoffen,
- Nachzerkleinerung,
- Feinabscheidung noch enthaltener Störstoffe (insbesondere Nassverfahren).

Eine gezielte Vorbehandlung von Abfällen für einen Voraufschluss organischer Feststoffe zur Optimierung des anaeroben Stoffumsatzes wird nur in wenigen Anlagen durchgeführt. Ein Voraufschluss von beispielsweise lignocellulosehaltigen Bestandteilen oder Fetten bei der Mitverarbeitung von Schlachtabfällen und Flotaten aus Fettabscheidern kann eine sinnvolle Behandlungsmaßnahme darstellen, wenn durch eine Beschleunigung und/oder Verbesserung des anaeroben Abbaus der biologische Verfahrensteil kleiner und kompakter ausgelegt und somit Investitionen und spezifische Betriebskosten eingespart werden können.

Aufschlussverfahren können grob in biologische, chemische und physikalische Verfahren sowie Kombinationen dieser Verfahrensgruppen eingeteilt werden. Grundsätzlich kann zwischen trockenen und nassen Aufbereitungsverfahren unterschieden werden. Trocken bedeutet nach ATV-DVWK [2003a], dass die Ausgangsmaterialien in

dem Zustand aufbereitet werden, in dem sie anfallen, also ohne Zugabe von Prozesswasser. Nass bedeutet, dass die Ausgangsmaterialien entweder pumpfähig sind oder ihre Aufbereitung unter Zugabe von Prozesswasser erfolgt. Liegt das wesentliche Ziel der Aufbereitung in einer Erhöhung der anaeroben Verfügbarkeit, so bietet sich eher eine Aufteilung der Verfahren anhand der grundlegenden zuvor genannten Aufbereitungsprinzipien an. Auf diese wird im Folgenden näher eingegangen. Die zitierten Veröffentlichungen befassen sich mit Biomassen, biologischen Reststoffen und anderen festen Abfällen sowie diversen flüssigen Reststoffen.

Es ist zu beachten, dass Ergebnisse und Effekte von Verfahren, wie sie beispielsweise in großer Zahl im Bereich der Klärschlammbehandlung untersucht wurden, neben einer Erhöhung der Gasausbeute im Anaerobbetrieb zum Teil andere Zielsetzungen verfolgen. Diese können z.B. die Schlamminimierung oder die Verringerung von Schaumbildung sein. Erfahrungen und Ergebnisse aus der Schlammdeintegration sind daher nur bedingt auf die Vorbehandlung fester Substrate übertragbar. Eine Übersicht über die verschiedenen Verfahrensgruppen gibt die Tabelle 4.1.

In den folgenden Kapiteln werden bereits erforschte und zum Teil großtechnisch umgesetzte Vorbehandlungsverfahren betrachtet und im Anschluss das Verfahren der Vakuum-Siede-Behandlung beschrieben. Auf Grundlage der hieraus und aus den vorherigen Kapiteln abzuleitenden Zusammenhänge werden der Forschungsbedarf sowie Arbeitshypothesen formuliert.

Tabelle 4.1: Desintegrationsverfahren für Abfälle und Schlämme, verändert nach [ATV-DVWK, 2000; Tidden, 2003; Eder und Günthert, 2003; Taherzadeh und Karimi, 2008]

Physikalische Verfahren	Chemische Verfahren	Biologische Verfahren
Mechanische Behandlung	Chemische Behandlung	Enzymatische Behandlung
<ul style="list-style-type: none"> - Rührwerkskugelmühlen - Strahlmühlen - Schwingermühlen - Hammermühlen - Schneckenmühlen - Schneidmühlen - u.a. Mahlverfahren - Prallreißer - Rotorscheren - Ultraschallhomogenisatoren - Hochdruckhomogenisatoren - Scherspalthomogenisatoren - Hochleistungspulstechnik - Stofflöser / Pulper - Perkolation¹ 	<ul style="list-style-type: none"> - Alkalische Vorbehandlung - Saure Vorbehandlung - Oxidative Vorbehandlung (Ozon, Peroxid, u.a.) - Osmotischer Schock - Detergentien 	<ul style="list-style-type: none"> - Enzymatische Lyse - Autolyse - Einfluss von Cellulasen - Phagen - Aerobe Hydrolyse²
<ul style="list-style-type: none"> - Mikrowellenaufschluss - Lysatzentrifugen - Prallstrahlverfahren - Trocken / Gefrieren - Dekompression mit N oder CO_2 		
Thermische Behandlung	Kombinationsverfahren	Mikrobielle Behandlung
<ul style="list-style-type: none"> - Überdruck, Heißwasser/Heißdampf, Sattdampf - Dampfexplosion - Thermodruckhydrolyse 	<ul style="list-style-type: none"> - Thermochemische Behandlung - Amonia-Fiber-Explosion mit Säure katalysierte Dampfexplosion - AFEX (Ammonia Fibre Explosion) - CO_2-Explosion 	<ul style="list-style-type: none"> - Ligninabbau durch Pilze - Lignocelluloseaufschluss durch Rumenorganismen - mikroaerobe Vorbehandlung

¹zum Teil mit Integration aerober Hydrolyse (dann auch biologisch)

²mit und ohne zusätzliche enzymatische Behandlung

4.2 Biologische Verfahren

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit waren biologische Einflüsse auf das Aufschlussverhalten organischer Stoffe eher von untergeordneter Bedeutung. Da jedoch eine Verfahrenskombination der Vakuum-Siede-Extraktion mit einer vorgeschalteten aeroben Vorerwärmung denkbar ist, wird kurz auf die biologischen Verfahren eingegangen.

Die mikrobielle aerobe Vorbehandlung, die in einer Reihe von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben untersucht wurde, soll aufgrund einer vorweggenommenen Hydrolyse im aeroben Milieu zu einem besseren Stoffaufschluss führen. Eine Reihe von Autoren berichten über eine positive Einflussnahme auf einen nachfolgenden anaeroben Behandlungsschritt (Biogas- und Ethanolgewinnung) [Santen, 2007; Miah et al., 2005; Borja et al., 1998; Mshandete et al., 2008; Busch und Sieber, 2006]. Eine aerobe Vorbehandlung kann auch mit physikalischen Behandlungsschritten, wie z.B. einer Perkolation, kombiniert werden [Santen, 2007]. Eine derartiges Vorbehandlungsverfahren ist jedoch eher als Verfahrensschritt einer zweistufigen, zweiphasigen Anaerobbehandlung einzuordnen (vgl. Kapitel 3.3.2).

Ein weiterer nutzbarer Effekt ist die über den exothermen Anaerobprozess erzielbare Vorerwärmung des Substrates. Hierdurch kann thermische Energie zur Erwärmung des wenig wärmewirksamen Anaerobprozesses eingespart werden. Es ist jedoch zu beachten, dass bei einer aeroben Vorbehandlung zunächst insbesondere leicht abbaubare Komponenten verstoffwechselt werden, die in der Folge dem Anaerobprozess nicht mehr zur Verfügung stehen und somit auch nicht zu Biogas umgesetzt werden können. Der aerobe Prozess verstoffwechselt die gleichen Stoffgruppen wie die anaerobe Gärung. Die Belüftung greift jedoch in der Regel anaerob schwer vergärbare Bestandteile in keinem nennenswertem Umfang an [Wurm, 1986]. Auch bei kurzen aeroben Behandlungszeiten von Klärschlämmen konnte Pfeiffer [1990] nur geringere Gasausbeuten als im unbehandelten Ansatz erzielen. Aufgrund des energetischen Aufwandes fiel die Energiebilanz daher trotz höherer Gesamtabbaugrade negativ aus.

Biologische Aufschlussverfahren werden auch für den anaeroben Bereich beschrieben. Mit Hilfe geeigneter Enzyme kann die Spaltung von Polysacchariden bis hin zu Lignocelluloseverbindungen im Anaerobprozess beschleunigt werden. Die Wirksamkeit von Enzymen zur Spaltung von Polysacchariden ist unumstritten und in der Industrie und vielen Prozessen ein genutztes Hilfsmittel [Oechsner und Lemmer, 2009]. Verschiedene Autoren [Schalow, 2009; Amon et al., 2005; Knopf et al., 2006; Viehmann, 2008; Parawira et al., 2005; Pesta und Lenz, 2006; Kretschmer, 1997] befassen sich mit dem Einsatz von einzelnen oder gemischten Enzymen im Stoffaufschluss

und Biogasprozess und konnten Steigerungen des substratspezifischen Methanertrages um mehr als 10 %, zum Teil über 50 % feststellen. Gerhardt et al. [2007] konnten auch in der großtechnischen Anwendung deutliche Gasertragssteigerungen (4 - 35 %) verbunden mit einer nachhaltigen Prozessstabilisierung nachweisen. Untersuchungen der Universität Hohenheim hingegen konnten diese Steigerungsraten nicht bestätigen [Oechsner und Lemmer, 2009].

Es liegen Arbeiten zu Vorbehandlungsmethoden mit verschiedenen Pilzen und Bakterien vor, die einen effektiven Aufschluss von Lignocellulosen beschreiben [Sun und Cheng, 2002; Dhouib et al., 2006; Taniguchi et al., 2005; Kurakake et al., 2007].

Der Zusatz von Prozesshilfsstoffen, die in kleineren Mengen dem Fermentationsprozess zugegeben werden, kann sich auf die Effizienz des Stoffabbaus auswirken. Der Nutzen der Zugabe verschiedener Spurenelemente ist bei Monovergärungsverfahren unumstritten. Durch Untersuchungen konnte belegt werden, dass durch die ergänzende Zugabe von Spurenelementen durch Mangelsituationen hervorgerufene Prozessstörungen aufgehoben werden können [Oechsner und Lemmer, 2009; Preißler et al., 2009].

4.3 Chemische Verfahren

Die Gruppe der chemischen Vorbehandlungsverfahren haben für das Forschungsvorhaben der vorliegenden Arbeit keine weitergehende Relevanz. Es wird daher lediglich kurz zur Vervollständigung möglicher Aufschlussmethoden auf die gängigen Mechanismen eingegangen.

Gängige chemische Vorbehandlungsmethoden nutzen verdünnte Säuren, Basen, Ammoniak, organische Lösemittel, Schwefeldioxid, Kohlendioxid oder andere Chemikalien, die die Bioverfügbarkeit erhöhen [Penaud et al., 1999; Hamelinck et al., 2003]. In der Ethanolfermentation sind Säure- und Laugenaufschlussverfahren Stand der Technik. Alle anderen Verfahren sind im Stadium der Entwicklung bzw. Erprobung [ebd.]. Die chemische Hydrolyse durch Zugabe von alkalischen oder sauren Reagenzien wird im Bereich der Klärschlammbehandlung in Kombination mit thermischen Behandlungsverfahren eingesetzt [Schmid-Schmieder, 2009; Chandra et al., 2007]. Zu unterscheiden sind die Mechanismen der chemischen Oxidation und der chemischen Hydrolyse [ATV-DVWK, 2003b]. Der Einsatz der chemischen Oxidation als Desintegrationsverfahren beruht in erster Linie auf dem Aufbrechen von Zellhüllen durch Radikale (OH^- , HO_2^-). Verfahrenstechnisch sind die thermisch chemische Nassoxidation, die nasschemische Oxidation und die aktivierte Nassoxidation zu unterscheiden [ATV-DVWK, 2003b].

Die chemische Hydrolyse bedient sich verhältnismäßig geringer Mengen starker Säuren bzw. Basen. Hierdurch wird die Hydrolysegeschwindigkeit proportional zur H^+ - bzw. OH^- -Konzentration in der Lösung beschleunigt. Es werden Zucker, Stärken, Proteine usw. in monomere Bausteine gespalten. Die Zellwandstruktur wird dabei aufgelöst. Die chemische Behandlung kann zur Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit bei erhöhter Temperatur durchgeführt werden. Bei der alkalischen Lösung wird tendenziell mehr organische Substanz in Lösung gebracht als bei der sauren Hydrolyse [ATV-DVWK, 2003b; Silverstein et al., 2007; Zhao et al., 2008].

In säure-katalysierte Hydrolyseverfahren werden in der Regel verdünnte Schwefel-, Salz- oder Salpetersäuren eingesetzt. Insbesondere mit Schwefelsäure (0,5 - 1,5 %, $T > 160\text{ }^{\circ}\text{C}$) werden industriell sehr gute Aufschlüsse erzielt und hohe Zucker- und Xylose-Erträge aus Hemicellulosen und anderen Stoffen gelöst [Wooley et al., 1999; Sun und Cheng, 2002; Silverstein et al., 2007; Zhao et al., 2008]. Nachteil derartiger Verfahren ist, dass die Säure vor dem weitergehenden biologischen Prozess wieder entfernt oder neutralisiert werden muss. Eine Alternative ist eine basische Vorbehandlung beispielsweise mit Natriumhydroxid oder Calciumhydroxid. Nahezu das gesamte Lignin und Teile der Hemicellulose werden hierdurch entfernt und die Reaktivität der Cellulose wird erhöht. Es ist jedoch die Umweltgefährdung dieser eher teureren Chemikalien zu berücksichtigen [Hamelinck et al., 2003; Chiu et al., 1997; Xu et al., 2007; Zhao et al., 2008].

4.4 Physikalische Verfahren

4.4.1 Allgemeine Anmerkungen

Eine physikalische Beanspruchung kann die zur Verfügung stehende reaktive Oberfläche und den Porenraum vergrößern sowie die Kristallinität und den Polymerisationsgrad von Cellulose verringern. Hierzu stehen unterschiedliche Mahl- und Bestrahlungsverfahren zur Verfügung. Auch Verfahren mit veränderten Druck und Temperaturbedingungen sind den physikalischen Verfahren zuzuordnen.

Unter die physikalischen Verfahren fallen neben den Schritten zur Erhöhung einer biologischen Verfügbarkeit auch die Verfahren, die eine Störstoffentfrachtung und eine Konditionierung des Substrates hinsichtlich dessen Förderfähigkeit oder weiterer prozesstechnischer Verarbeitbarkeit zum Ziel haben.

Im Folgenden werden die physikalischen Aufbereitungsverfahren jedoch ausschließlich unter dem Aspekt der Erhöhung der biologischen Verfügbarkeit betrachtet. Sieb-, Sortier- und Klassierverfahren trennen – neben einer prozessbedingt eher unbeab-

sichtigten Zerstörungs- und Mahlwirkung – lediglich Stoffgruppen unterschiedlicher Korngrößen oder Eigenschaften voneinander und haben keinen direkten Einfluss auf die spätere biologische Verfügbarkeit des behandelten Substrates. Auch diese Verfahren werden an dieser Stelle daher nicht weitergehend betrachtet.

4.4.2 Mechanische Verfahren

Mahlverfahren als Bestandteil der mechanischen Verfahren zur Korngrößenzerkleinerung und Auffaserung strukturreicher Stoffe werden häufig als erster Verfahrensschritt vor anderen Aufschlussverfahren eingesetzt. Kolloidmühlen, Fibrilliermühlen, Stofflöser/Pulper und Perkolationsverfahren werden für nasse und suspendierte Stoffe verwendet, wobei mit den beiden letztgenannten Verfahren zusätzlich die Überführung möglichst großer Organikfrachten in eine Flüssigphase erreicht werden soll. Für trockene Substrate können Extruder sowie diverse Zerkleinerungsaggregate und Mühlen eingesetzt werden. Kugelmühlen sind sowohl für trockene als auch nasse Substrate geeignet [Taherzadeh und Karimi, 2008]. Für Bioabfälle kommen zudem Rotorscheren und Prallreißer zum Einsatz. Diese und weitere mechanische Verfahren sind in der Tabelle 4.1 aufgeführt.

Eine mechanische Beanspruchung eines organischen Partikelkollektives führt zu kleineren Medianwerten der massenbezogenen Summenverteilungsfunktion, zu größeren spezifischen Oberflächen und zu einer Auflockerung der Substratstruktur, wodurch die mikrobielle Angriffsfläche vergrößert wird (Reduktion der Kristallinität und Auflösung lignininkrustierter Bestandteile) [Mundhenke, 2002]. Dies führt zu einer Verlagerung des geschwindigkeitsbestimmenden Schrittes im Gesamtprozess des anaeroben Abbaus, da durch die mechanische Beanspruchung die hydrolytischen Reaktionen begünstigt und die anaerobe Abbaubarkeit verbessert wird [Mais et al., 2002; Fan et al., 1980; Zeng et al., 2007; Sidiras und Koukios, 1989; Weiland, 2001b].

Dies führt im Allgemeinen zu höheren Biogas- oder Ethanolausbeuten. Gezielte Versuche zur Gasbildung zerkleinerter und unzerkleinerter organischer Materialien von Palmowski [2000] zeigen einen differenzierten Einfluss. Die Gasbildung leicht abbaubarer Substrate (z.B. Äpfel) lässt sich durch eine Zerkleinerung nicht signifikant steigern, allerdings halbierte sich die benötigte Verweilzeit. Die Zerkleinerung schlecht abbaubarer Substrate (z.B. Heu) führte ebenfalls zu einer Halbierung der Verweilzeit und zusätzlich zu einer um ca. 10 % gesteigerten Gasbildung. Palmowski [2000] stellte fest, dass die Abnahme der Festigkeit organischer Stoffe mit einem zunehmendem Wassergehalt einhergeht.

In Folge der Zerkleinerung durch eine Kombination aus Scher-, Schneid- und

Druckbeanspruchung lief in Versuchen von Mundhenke [2002] insbesondere die Hydrolyse rascher ab, sodass große Anteile an leicht abbaubaren Stoffen zur Verfügung standen und bei hohen Raumbelastungen die Gefahr der Versäuerung bestand. Dieser Effekt wurde besonders bei leicht abbaubaren Substraten beobachtet. Die höheren Gasausbeuten werden hier jedoch im Wesentlichen auf die Auflockerung des Substrates zurückgeführt. Erste Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit des Verfahrens stellte Mundhenke [2002] anhand des Energieverbrauchs und des zusätzlichen Biogasertrages an und kommt zu dem Schluss, dass ein derartiges Verfahren zumindest für schwer abbaubare Substrate sinnvoll einsetzbar ist.

Das VTI [2004] hat Untersuchungen zur Aufbereitung unterschiedlicher auf landwirtschaftlichen Vergärungsanlagen einsetzbarer Stoffe (Maissilage, Weizenstroh, Papierschlamm, Landschaftspflegegras) durchgeführt. Bei allen Substraten konnte durch eine Zerkleinerung deutlich gesteigerte Biogasausbeuten bzw. Verkürzungen der Verweilzeit in den Gärversuchen nachgewiesen werden. Die Untersuchungen zeigen jedoch auch, dass eine zunehmende Feinstaufbereitung nicht proportional in erhöhte Biogasausbeuten umsetzbar ist. Aufgrund der Zellstruktur der Pflanzen konnte verallgemeinernd geschlussfolgert werden, dass sich quetschende Zerkleinerung günstiger auf die Vergärbarkeit auswirkt als schneidende Zerkleinerung [VTI, 2004].

Bei Untersuchungen zur Vergärbarkeit von siliertem Mais mit unterschiedlichen Hächsellängen (zwischen 4 und 10 mm) zeigte sich kein signifikanter Unterschied bei der Abbaugeschwindigkeit und dem Methanertrag im Verlauf der Vergärung [Oechsner und Lemmer, 2009]. Diese Untersuchungen weisen abermals darauf hin, dass Pflanzen oder Pflanzenteile, die aufgrund ihrer Zusammensetzung leicht abbaubar sind (wie z.B. grüner Mais), nicht wesentlich durch die zusätzliche Aufbereitung in ihrer Abbaugeschwindigkeit und ihrem Gasertrag beeinflusst werden können. Rohfaserreiches und zum Teil auch lignifiziertes Material wie Stroh ist dagegen durch den mechanischen Aufschluss in der Abbaubarkeit deutlich zu beeinflussen [Oechsner und Lemmer, 2009]. Inwieweit der Energiebedarf für den Aufschlussvorgang die höhere und schnellere Energieumsetzung kompensiert, muss durch genaue Untersuchungen im Einzelfall überprüft werden.

Aufbauend auf Untersuchungen von Bunge [1992] führte Müller [1996] Untersuchungen zum Klärschlammaufschluss (Überschussschlamm) mit einer Rührwerkskugelmühle durch und erreichte einen Aufschlussgrad von 22 - 55 %. Der Abbaugrad in Suspensionsreaktoren hingegen ließ sich durch den Einsatz der Kugelmühle nicht oder nur geringfügig steigern, auch wenn nach kurzen Verweilzeiten zunächst höhere Abbauraten erzielt werden konnten. Seiler und Pöpel [1998] führten ebenfalls anaero-

be Abbauprobversuche mit durch Rührwerkskugelmöhlen aufgeschlossenen Überschlussschlamm durch und berichten von Erhöhgungen des Abbaugrades um 50 - 140 %, je nach hydraulischer Verweilzeit. Die Ergebnisse weisen auf eine starke Abhängigkeit des erreichbaren Aufschlusgrades vom verwendeten Überschlussschlamm hin. Aus dem Gebiet der Klärschlammintegration sind weitere mechanische Verfahren bekannt (z.B. Strahl- und Schwingermöhlen, Pressen sowie Lysatzentrifugen), auf die an dieser Stelle nicht weiter eingegangen wird (s. hierzu Eder und Günthert [2003] und ATV-DVWK [2000]).

Reulein et al. [2007] führten Untersuchungen zur mechanischen Entwässerung von Biomasse durch, die aufgrund des Einflusses der verwendeten Schneckenpresse thematisch ebenfalls in den Bereich mechanischer Verfahren fallen. Mittels des Verfahrens soll eine leicht vergärbare organisch angereicherte Flüssigphase anaerob zu Biogas umgesetzt und der verbleibende Presskuchen nach weitergehender Trocknung einer thermischen Nutzung zugeführt werden. Die Autoren berichten von einer bereits durch den Biogasgewinn mehr als energieautarken Prozessführung. Die Gesamtenergiebereitstellung erreicht netto zwischen 65 und 75 % der als Frischmasse zur Verfügung stehenden Primärenergie. Spezifische Steigerungsraten der Abbaubarkeit werden nicht angegeben.

In der Literatur sind verschiedene Verfahrensansätze zur Kombination physikalischer Verfahren mit chemischen oder anderweitigen Aufschlussmethoden beschrieben. Beispielhaft sei hier auf chemisch-physikalische Verfahren verwiesen [Möller, 1992; Herfellner und Bochmann, 2006]

4.4.3 Temperaturbehandlungen

Herkömmliche thermische Desintegrations- und Aufschlussverfahren unterscheiden sich hinsichtlich der Behandlungstemperatur in niederthermische Verfahren bei Temperaturen $< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ und Verfahren $> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Niederthermische Verfahren können unter Normaldruck erfolgen, während Verfahren über dem Siedepunkt als Thermo-Druck-Hydrolyse bezeichnet werden [ATV-DVWK, 2003b]. Die hier angestrebten hohen Substrattemperaturen sind – wenn keine vollständige Trocknung angestrebt wird – nur unter erhöhtem Druck zu erreichen. Wie im Kapitel 3.2.3 hergeleitet, ist davon auszugehen, dass nicht der Druck, sondern die Prozesstemperatur das Aufschlussverhalten wesentlich beeinflusst.

Die Wärmezufuhr kann über direkten Kontakt mittels Wärmetauscher oder alternativ durch Injektion von Heißdampf erfolgen. Im Arbeitsbericht der ATV-DVWK [2003b] wird von mehreren niederthermischen Ansätzen berichtet, bei denen ein ge-

steigerter oTR-Abbau sowie eine höhere Biogasproduktion thermisch aufgeschlossener Schlämme beobachtet werden konnte. Auch Barjenbruch et al. [2001] berichten von Aufschlussversuchen bei verschiedenen Temperaturen (80 - 121 °C), die zur Erhöhung der Abbaugrade und der Gasausbeute führen. Gasausbeuten konnten um bis zu 50 % gesteigert werden.

Im Arbeitsbericht der ATV-DVWK [2003b] werden verschiedene Arbeiten zitiert, in denen thermische Verfahren mit Temperaturen > 100 °C untersucht wurden. Bei höheren Temperaturen (> 175 - 180 °C) wurde von mehreren Autoren neben erhöhten Aufschlussraten die Bildung schwer abbaubarer organischer N-Verbindungen beobachtet, die einen inversen Effekt auf die anaerobe Abbaubarkeit der Schlämme hatten. Bis zu diesen Temperaturen konnten höhere Aufschlussraten ($CSB_{gelöst}/CSB_{gesamt}$) und eine gesteigerte Methanproduktion erreicht werden [Nickel, 2002; Pinnekamp, 1987; Elbing und Dünnebeil, 1999]. Auch Bougrier et al. [2007] berichten von der Bildung refraktären CSB bei einer Temperaturbehandlung kommunaler Klärschlämme bei 190 °C, konnten aber ebenfalls signifikant erhöhte Abbauraten für die enthaltenen Lipide, Kohlenhydrate und Proteine nachweisen. Dies führte ebenfalls zu höheren Biogasproduktionsraten.

In einer Verfahrensvariante untersuchten Prechtel et al. [1998] die gemeinsame Ausfäulung von Klärschlamm und Bioabfällen nach thermischer Vorbehandlung. Orientierende Untersuchungen zeigten, dass nach der thermischen Behandlung über 60 Minuten bei 160 - 200 °C und 40 bar bis zu 70 % der organischen Feststoffmasse in die flüssige Phase überführt wurden. Die Fermentation dieser flüssigen Phase führte innerhalb von zehn Tagen zu Abbaugraden von bis zu 90 % des CSB. Die Ergebnisse dieser Vorversuche wurden später in Reihenuntersuchungen zur Thermodruckhydrolyse organischer Abfälle bestätigt [Prechtel, 2001]. Der anaerobe Abbau der Hydrolysate von vorbehandelten Küchen- und Kantinenabfällen verlief gegenüber dem Rohmaterial um 400 % schneller. Der spezifische Biogasertrag ließ sich um etwa 10 % steigern. Der nach der Hydrolyse verbliebene Feststoff wurde gemeinsam mit der Flüssigphase anaerob umgesetzt.

Amon [2006] beschreibt Versuche mit einer einfachen Hitzebehandlung mittels Wasserdampf in einem Schnellkochtopf bei einem erhöhten Druck um 0,4 - 0,8 bar und bei 109 - 116 °C ohne zusätzlichen Wasserzusatz über eine Dauer von einer Stunde. Die Dampfbehandlung führte bei Sonnenblumensilage und Wiesengrassilage zu einer wesentlichen Erhöhung der Methanausbeute (65 und 23 %). Bei Triticale (Frischsubstrat) war die Steigerung durch die Dampfbehandlung nur minimal (4 %) und im Fall des Weizens (Frischsubstrat) kam es sogar zu einer Absenkung der

Methanausbeute (5 %). Füleky und Czinkota [1993] beschreiben ein Verfahren bei ähnlichen Bedingungen (Temperatur: 102 - 105 °C, Druck: 1,2 - 1,5 bar) zur Perkolation von Nährstoffen aus Bodenproben, das gute und schnelle Extraktionsergebnisse erreichte.

Mit erhöhten Temperaturen und korrespondierend hohen Drücken wird auch bei der sogenannten Sattedampfbehandlung (oder Dampfbehandlung) verfahren. Hier findet ein Aufschluss unter erhöhten Prozessdrücken in einer gesättigten Wasserdampf-atmosphäre statt. Die Behandlungstemperaturen reichen im Allgemeinen bis ca. 250 °C, bei einem maximalen Druck von 25 bar [Radke, 2000]. Das Verfahren wurde für feste Substrate wie Stroh und verschiedene Hölzer sowie zum Aufschluss von Klärschlämmen untersucht. Verfahrenstechnisch können autohydrolytische Verfahren und die kontinuierliche Betriebsweise der Rapid-Steam-Hydrolysis/Continuous Extraction (RASH) unterschieden werden. Die Autohydrolyse ist durch ein hohes Wasser/Trockenmasse-Verhältnis von etwa 10/1 gekennzeichnet. Eine Aufheizung des Materials geschieht über ca. zwanzig Minuten. Normalerweise wird der Prozess gerührt, die Abkühl- und Druckentspannung erfolgt simultan. Der RASH-Prozess ist vergleichbar der Sattedampfbehandlung bei geringerem Sattedampfbedarf und einer geringeren Reaktionsaktivität. Kennzeichnend ist eine kontinuierliche Betriebsführung, wobei der kontinuierlich anfallende Kondensatstrom die leicht löslichen Komponenten enthält [Radke, 2000].

Die Untersuchungen von Radke zur Auswirkung einer Sattedampfbehandlung auf die biochemische Verfügbarkeit verschiedener Stoffströme aus einer Vergärungsanlage für Bioabfälle zeigen eine signifikante Zunahme der Löslichkeit infolge einer Sattedampfbehandlung für alle untersuchten Fraktionen (Rohpulp Fasern, Frischsuspension, Frischsuspension Fasern und Gärrückstand). Die Löslichkeit erhöhte sich mit Zunahme der Behandlungsintensität (Druck, Temperatur, Verweilzeit), wobei der Einfluss des Drucks und damit der Behandlungstemperatur über die Verweilzeit dominierte. Eine geregelte Druckentspannung minimierte deutlich die Auswirkung der explosionsartigen Zerfaserung und damit den Effekt der sich günstig auf die Löslichkeiten auswirkte.

Die Sattedampfbehandlung eignete sich insbesondere für die untersuchte Frischsuspension, bei der die in 500 Stunden produzierte Biogasmenge um 40 % im Vergleich zum unbehandelten Substrat gesteigert werden konnte. Es zeigte sich, dass der wesentliche Gewinn des Biogasertrages aus der Flüssigkeit – dem Hydrolysat – gebildet wurde. Ein entwässerter Reststoff wäre demnach eher als Ausgangssubstrat für eine aerobe Rotte zu nutzen, während der gelöste Substratanteil für einen Anaerobreaktor

geeignet ist.

Die positiven Effekte einer Sattdampfbehandlung konnte Radke [2000] zudem in weiteren Versuchen mit Biertrebern nachweisen. Auch hier konnten höhere Biogasausbeuten und zusätzlich höhere Methankonzentrationen nach einer Vorbehandlung erzielt werden. Der Einfluss auf ebenfalls untersuchte Trester führte bei kurzen Behandlungszeiten zu einer Beschleunigung des anaeroben Umsatzes (ca. 33 %). Sattdampfbehandlungen > 10 Minuten führten jedoch zu schlechteren Ergebnissen als die der unbehandelten Proben. Generell führte die Sattdampfbehandlung der Trester zu keiner signifikanten Zunahme zusätzlich biologisch verstoffwechselbarer Kohlenstoffe [Radke, 2000].

Aufgrund der im Kapitel 3.2.3 dargelegten Zusammenhänge und den Erläuterungen von Radke [2000] ist zu schlussfolgern, dass die beobachteten positiven Effekte der Sattdampfbehandlung im Wesentlichen auf dem Einfluss der hohen Behandlungstemperaturen und raschen Änderungen des Drucks beruhen.

Schieder et al. [2000] weisen darauf hin, dass die optimalen Parameterkombinationen aus Temperatur und anliegendem Druck stark substratabhängig sind. Für Kantinenabfälle wurden Temperaturen zwischen 160 und 200 °C bei einem Druck bis 40 bar (60 Min.) als effektivste Form der Vorbehandlung identifiziert. Die optimalen Bedingungen bei derart hohen Drücken könnten darauf hinweisen, dass die im Kapitel 3.2.3 beschriebenen hohen Widerstandskräfte durch den zusätzlichen Temperatureinfluss verringert werden.

Ein ebenfalls aus höher temperierten Verfahren abgeleiteter Aufschluss ist der hydrothermische Aufschluss durch Dampfexplosion. Das Verfahren nutzt die auch bei Radke [2000] erwähnte explosionsartige Zerfaserung. Der Reaktor wird sehr schnell mit Heißdampf (meist 160 - 260 °C) gefüllt, eine bestimmte Zeitspanne (wenige Sekunden bis 20 Minuten) bei dem hieraus resultierenden hohen Druck gehalten und der Druck schlagartig gelöst, was zu einer explosiven Druckverminderung führt [Taherzadeh und Karimi, 2008]. Hierdurch wird in den Fasern eingeschlossenes Wasser sehr schnell ausgetrieben. Dies führt u.a. dazu, dass der größte Teil der Hemicellulosen entfernt wird [ebd.]. Negro et al. [2003] verwendeten bei Versuchen mit Schwarzpappeln Reaktionsgefäße mit einem maximalen Arbeitsdruck von 41,2 bar. Die Leistung der enzymatischen Hydrolyse und einer anschließenden Fermentation konnte durch das Verfahren deutlich erhöht werden. Weitere Arbeiten zu Dampfexplosionsverfahren mit verschiedenen Substraten weisen ebenfalls signifikante Erhöhungen des Substrataufschlusses nach [Boussaid et al., 1999; Varga et al., 2004; Ruiz et al., 2006; Kurabi et al., 2005; Sun et al., 2004]. Die Mehrzahl der Arbeiten

beschäftigt sich nicht mit Abfallstoffen und sind in ihrer Methodik und den erzielten Ergebnissen auf diese nicht direkt übertragbar. Dies gilt insbesondere für Betrachtungen zur Energieeffizienz.

Liu et al. [2002] führten Versuche mit Bio- und Restabfällen durch und konnten bis zu doppelt so hohe Methangasbildungsraten verzeichnen. Das gleiche Verfahrensprinzip der Dampfexplosionsverfahren ist unter der Bezeichnung Thermodruckhydrolyse im Bereich der Klärschlammbehandlung bekannt. Rand et al. [2008] erzielten in Laborversuche bei einer Hydrolysedauer von 30 Minuten, einer Behandlungstemperatur von 160 °C und 6 bar Druck Steigerungen des für den anaeroben Abbau verfügbaren CSB in der flüssigen Phase um 300 %. In Gasertragstests wurde eine Zunahme der Gasbildung um nahezu 20 % bei in etwa gleichen Methangehalten gemessen.

Die Vorbehandlung unter Wärmezufuhr wird oftmals kombiniert mit zusätzlichen chemischen Verfahren, die meistens einen höheren Aufschlussgrad und höhere Abbauleistungen respektive Biogasbildungen erreichen als rein thermische Verfahren [Ando et al., 1988; Tanaka et al., 1997; ATV-DVWK, 2003b; Taherzadeh und Karimi, 2008]. Zum Einsatz kommen NaOH, H₂SO₄, CO₂, SO₂, O₂ und andere chemische Reaktanden.

Die Dampfdruckverfahren erfüllen in den meisten Fällen grundsätzlich die in der Einleitung (Kapitel 4.1) genannten Bedingungen für ein geeignetes Aufschlussverfahren [Taherzadeh und Karimi, 2008; Kim et al., 2003; Moeller-Chávez und González-Martínez, 2002]. Im Bereich der Abfall- und Reststoffverwertung ist dies aufgrund des oftmals hohen und kostenaufwendigen Energiebedarfs hingegen nicht immer der Fall.

4.4.4 Druckbehandlung

Auch die Gruppe der Verfahren, die mittels eines Druckunterschiedes einen Aufschluss bewirken, gehört zu den physikalischen Verfahren.

Im Bereich der Klärschlammbehandlung liegen Untersuchungen zum Aufschluss durch Hochdruckhomogenisatoren vor, die belegen, dass bei Drücken von 200 bar Aufschlussgrade von 50 % erzielt werden, bei 600 bar lag der Aufschlussgrad bei 85 %. Der anaerobe Abbaugrad konnte in Folge des Aufschlusses um bis zu 20 % gesteigert werden. Bei einer Verweilzeit von vier Tagen wurde ein Abbaugrad von 71 % erreicht. Ein energieautarker Betrieb erscheint nach den erzielten Ergebnissen möglich [Müller, 1996].

Das Verfahrensprinzip beruht auf hohen Druckdifferenzen, daraus resultierenden Flüssigkeitgeschwindigkeiten von bis zu 300 m/s und den durch die hierdurch her-

vorgerufene Druckabnahme entstehenden Kavitationsblasen. Kollabieren diese, entstehen energiereiche Schubspannungsfelder in denen Zellen aufgeschlossen werden.

In Bezug auf die vorliegende Arbeit ist zu berücksichtigen, dass das Verfahren der Hochdruckhomogenisation nach dem Verfahrensprinzip „Homogenisierventil“ auf Flüssigkeiten und Suspensionen beschränkt ist.

Hochdruckhomogenisatoren werden ursprünglich erfolgreich in Laborverfahren zum Aufschluss von Zellen im Labormaßstab eingesetzt [Middelberg, 1995; Kleinig und Middelberg, 1996; Kampen, 2005]. Für den Zellaufschluss werden verschiedene Beanspruchungsarten diskutiert. Zum einen werden sogenannte Microjets für die Öffnung der Zellen verantwortlich gemacht. Dies würde bedeuten, dass der Flüssigkeitsstrahl ein Loch in die Zellwand schlägt. Andere Autoren benennen Scherkräfte von Wirbeln, die aus implodierenden Kavitationsblasen stammen sowie turbulente Scherfelder als Ursachen des Zellaufschlusses [Middelberg, 1995; Kampen, 2005]. Untersuchungen von Kampen et al. [2004] weisen darauf hin, dass die Zellen aufgrund des Dampfdrucks der eingeschlossenen Flüssigkeit platzen, wenn die Zelle in Kontakt mit einer wachsenden Kavitationsblase kommt. Andere Zerkleinerungsvorgänge wie z.B. Prall, Vibrationen und Expansion gelten nicht als bestimmend [Jahnke, 2000].

Ebenfalls mit Druckunterschieden arbeitende Verfahren, bei denen die wesentliche Stellgröße jedoch die Behandlungstemperatur ist, sind im Kapitel 4.4.3 aufgeführt.

4.4.5 Sonstige physikalische Verfahren

Neben den oben beschriebenen Verfahren existieren weitere physikalische Verfahren zur Erhöhung des Aufschlussgrades organischer Substrate und der hieraus resultierenden Gasbildungsraten.

Ochs [2005] entwickelte einen Mikrowellendruckaufschluss als Schnelltest zur Bestimmung der anaeroben Abbaubarkeit. Das Verfahren stieß bei hohen Cellulose- und Ligninanteilen, bei hohen C/N-Verhältnisse und fettreichen Substanzen an seine Grenzen und war nicht für eine großtechnische Anwendung konzipiert. Eine erfolgreiche Anwendung einer Mikrowellenbehandlung auf Sekundärschlamm beschreiben Park et al. [2004]. Grundsätzlich werden bei dem Verfahren die hohen Temperaturen sowie der Dampfdruck in der Mikrowelle als ursächlich für eine Beeinträchtigung der Durchlässigkeit und Stabilität der Zellmembran und letztlich dem Bruch der Zelle benannt [Islam und Weil, 1998].

Bestrahlung mit Gamma-Strahlen, Elektronen und Mikrowellen können die enzymatische Hydrolyse von Lignocellulosen verbessern [Taherzadeh und Karimi, 2008].

In der Literatur sind verschiedene Bestrahlungsverfahren (zum Teil mit zusätzlicher chemischer Behandlung) zu finden, die einen positiven Einfluss auf die Hydrolyse und nachfolgende Abbauschritte ausüben [Kumakura, 1984; Mamar und Hadjadj, 1990].

Nickel [2002] und Wang et al. [1999] führten Versuche zur Klärschlammdeintegration mit Ultraschall und die hierdurch hervorgerufene Kavitation durch. Die unter Normaldruck durchgeführte Behandlung konnte – abhängig von der Intensität der Behandlung – die Gasausbeute steigern und die zu entsorgende Schlammmenge reduzieren. Eder [2005] beschreibt die großtechnische Anwendung dieses Verfahrens auf einer Kläranlage und berichtet von Steigerungen der spezifischen Gasausbeute von 11 % durch die Behandlung mit Ultraschall bei positiver Gesamtenergiebilanz.

4.4.6 Die Vakuum-Siede-Behandlung

Das Verfahren der Vakuum-Siede-Behandlung mit anschließender Extraktion (Vakuum-Siede-Extraktion - VSE) ist in eine Kombination unterschiedlicher Behandlungsschritte eingebunden und soll einer Überführung möglichst großer Mengen organischer und vergärbare Substanz in eine Flüssigphase dienen. Eine schematische Darstellung der Einbindung der VSE in das Gesamtverfahren zeigt die Abbildung 4.1.

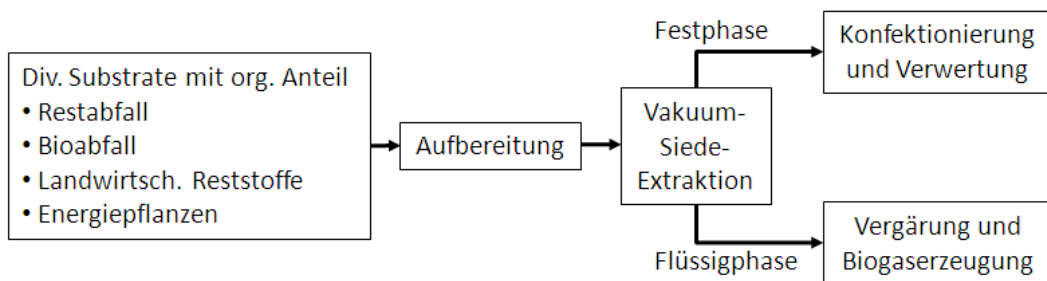


Abbildung 4.1: Schematische Einbindung der Vakuum-Siede-Extraktion in ein Gesamtverfahren

Die Vakuum-Siede-Extraktion setzt sich aus folgenden Behandlungsschritten zusammen:

- Mechanische Aufbereitung (Nutzung bereits existierender Technologien),
- Vakuum-Siede-Behandlung,
- Extraktion (Fest-Flüssig-Trennung).

Der zu behandelnde Feststoff wird nach einer materialspezifischen mechanischen Aufbereitung (Siebung, Zerkleinerung, Störstofftrennung) einem Vakuum-Siede-Reaktor zugeführt und ca. 15 - 30 Minuten einem Unterdruck von bis zu $50 \text{ hPa}_{\text{absolut}}$ und einer korrespondierenden Siedetemperaturen von ca. 32°C im Substrat sowie mechanischer Umwälzung ausgesetzt. Hierdurch sollte ein weitergehender Aufschluss anaerob schwer oder verzögert verfügbarer Komponenten erreicht und die Überführung dieser Komponenten in eine Flüssigphase begünstigt werden. Um einen hohen Temperaturgradienten und damit effiziente Wärmeübertragung zu gewährleisten, kann die Temperatur der Mantelheizung auf eine höhere Temperatur (z.B. 100°C) eingeregelt werden, die auf zahlreichen Anlagenstandorten als Abwärme anderer Prozesse zur Verfügung steht (vgl. Kapitel 4.5).

Bei den im Inneren des Reaktors herrschenden Druckverhältnissen (50 hPa) siedet freies Wasser bereits bei Temperaturen um 32°C , so dass ein entsprechender Temperaturgradient gegeben ist. In Anlehnung an das Verfahren des Dampfexplosionsaufschlusses war zu erwarten, dass die Kombination thermischer Energie und zweimaliger rascher Druckänderung eine desintegrierende Wirkung verursacht und hierdurch die Verfügbarkeit der anaerob abbaubaren Organik für den nachfolgenden Anaerobprozess gesteigert wird (vgl. auch Kapitel 4.5).

Im Anschluss an die Vakuum-Siede-Behandlung wird das Substrat mit Extraktionswasser (Frisch- bzw. Prozesswasser) angemaischt, um einen Großteil der aufgeschlossenen Organik in die Flüssigphase zu überführen. Der Anmischvorgang kann sowohl im Vakuum-Reaktor selbst (vgl. Kapitel 5.2), als auch in einem separaten Mischer/Extraktor (vgl. Kapitel 5.3) erfolgen. Die mit anaerob abbaubarer Organik angereicherte Flüssigphase wird durch ein- oder mehrfaches Abpressen separiert und anschließend in einem Anaerobprozess zur Biogasgewinnung eingesetzt. Der Feststoff kann nach weitergehender Aufbereitung als Brennstoff konfektioniert werden (vgl. Avila [2008]) oder nach einer geeigneten Nachrotte als Kompost (Bioabfall) bzw. ablagerungsfähiges Deponat (Restabfall) vorliegen. Die weitergehende Behandlung verbleibender Reststoffe ist nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Der ursprünglich vorgesehene Verfahrensablauf ist in der Abbildung 4.2 aufgeführt.

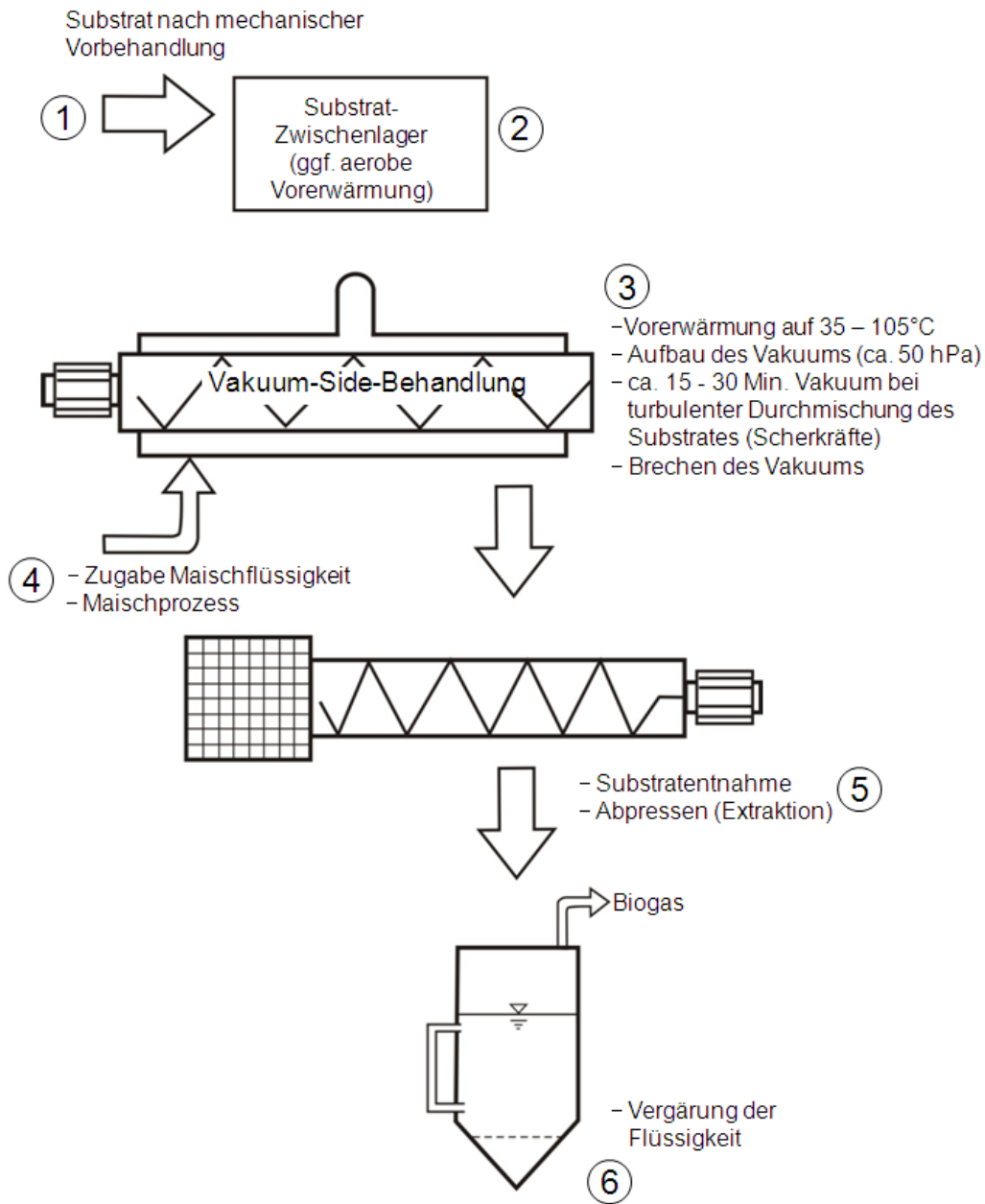


Abbildung 4.2: Grundschemata des ursprünglich projektierten Verfahrensablaufs der Vakuumsiede-Extraktion

4.5 Ableitung des Forschungsbedarfs

Im Hinblick auf die Nutzung nachwachsender Rohstoffe weisen Reulein et al. [2007] darauf hin, dass das Verhältnis von erzeugtem Endenergieträger zur in der Biomasse gespeicherten Energie in vielen Fällen nur 1:4 ergibt oder sogar noch darunter liegt. Dies gilt im weiteren Sinne auch für die Nutzung der in biologischen Abfällen und Reststoffen festgelegten Energie. Bei herkömmlichen Verfahren zur Umwandlung von Biomassen in Methan bleiben ca. 20 - 40 % der C-Verbindungen energetisch ungenutzt, da diese anaerob nicht abgebaut werden können.

Bisher untersuchte Aufschlussverfahren verursachen – sofern sie überhaupt für feste Substrate geeignet sind – oftmals hohe Betriebskosten. Dies kann einerseits durch hohe energetische Aufwendungen und andererseits durch notwendige Zuschlag- und Betriebsstoffe bedingt sein. In Verfahrenskombination mit einer Vergärung können diese Aufschlussverfahren bei unsachgemäßer Anwendung sogar zu einer Verschlechterung des Stoffumsatzes im Vergärungsreaktor führen. Als geeignet erweisen sich daher Verfahren, die ohne den Einsatz teurer oder umweltbelastender Chemikalien und Zuschlagstoffe auskommen und auf den jeweiligen Anlagen anfallende Prozessabwärme sinnvoll nutzen können. Dies bestätigen auch die Untersuchungen und Berechnungen von Radke [2000], der nachweisen konnte, dass sich eine Erhöhung der biochemischen Verfügbarkeit stärker auf die Kostenreduktion auswirkt als eine Veränderung prozesstechnischer und betriebswirtschaftlicher Eingangsgrößen. Weiterhin wird deutlich, dass für eine wirtschaftliche Optimierung des Gesamtprozesses dem Stoffaufschluss die höchste Bedeutung zukommt.

Der Mehrbedarf an Energie und die anfallenden Investitionskosten sind nur zu rechtfertigen, wenn damit die Leistung einer nachgeschalteten Vergärungsanlage entsprechend gesteigert werden kann. Die Wirtschaftlichkeit thermisch induzierter Aufschlussverfahren wird deutlich verbessert, wenn die erforderliche Wärme aus Überschusswärme anderer Anlagenteile oder benachbarter Anlagen genutzt werden kann. Durch die Integration effektiver Aufschlussverfahren und einen damit einhergehenden schnelleren Substratabbau in der Anaerobstufe kann bestehendes Reaktorvolumen besser ausgenutzt, die negativen Auswirkungen von Stoßbelastungen abgefangen und im Falle einer Um- oder Nachrüstung weniger erforderliches Reaktorvolumen realisiert werden.

Nicht alle positiven Ergebnisse von Aufschlussversuchen mit organischen Stoffen sind direkt auf die in der vorliegenden Arbeit verwendeten pflanzlichen Substrate übertragbar. Grundsätzlich weisen die zum Teil heterogenen Ergebnisse bereits vorliegender Forschungsarbeiten deutlich darauf hin, dass die Wirksamkeit der einge-

setzten Vorbehandlungs- und Aufschlussverfahren neben verfahrenstechnischen Fragestellungen stark von den eingesetzten Substraten anhängt. Dies ist besonders auffällig bei so unterschiedlichen Substraten wie Klärschlämmen und stapelfähigen biologischen Reststoffen oder nachwachsenden Rohstoffen, da die festen Substrate in der Regel erhebliche Anteile an Hemicellulosen, Cellulosen, Lignocellulosen oder sogar lignininkrustierten Fraktionen aufweisen (vgl. Kapitel 3.2).

Stoffliche Unterschiede bestehen auch hinsichtlich des Aufbaus und der Stabilität der Zellwände. Die pflanzliche Zellwand wird im Wesentlichen aus Cellulose gebildet. Pilze verwenden Chitin. Tierische Zellen haben keine Zellwände. Wie in den Kapiteln 3.2.2 und 3.2.3 beschrieben, weisen pflanzliche Zellen in Abhängigkeit ihres Alters und der damit verbundenen Einlagerung von Lignin sowie des Kristallinitätsindex eine hohe Festigkeit auf. Die besonders hohe Relevanz der spezifischen Oberfläche für die Hydrolisierbarkeit macht deutlich, warum Vorbehandlungsverfahren, die eine Aufspaltung des Zellverbundes und möglicherweise auch der Zellen erreichen (wie z.B. bei Dampfexplosionsverfahren), zu hohen Abbauleistungen und Gasbildungsraten in nachgelagerten Anaerobprozessen führen.

Weitere Unterschiede bestehen zwischen bereits vorversäuerten Silagen und frischen pflanzlichen Substraten [Amon, 2006]. Zusätzlich kann – im Falle der nachwachsenden Rohstoffe – das Vegetationsstadium, in dem die Gärrohstoffe geerntet werden, das Ausmaß der Wirkung von Vorbehandlungsmaßnahmen beeinflussen, da sich der Gehalt und die Zusammensetzung der Rohfaser im Verlauf der Vegetation verändern (vgl. auch Kapitel 3.2). Aufgrund jahreszeitlicher Schwankungen und Veränderungen sind auch für biologische Abfallfraktionen saisonale Schwankungen bekannt. Sieht man von der Anwendung auf Monochargen ab, muss ein effektives Vorbehandlungs- und Aufschlussverfahren die Erhöhung der anaeroben Verfügbarkeit für eine Vielzahl der anfallenden Substrate gewährleisten.

Aus bereits vorliegenden Untersuchungsergebnissen ist bekannt, dass eine Behandlung mit erhöhten Temperaturen und korrespondierenden hohen Drücken zu einer Erhöhung der Verfügbarkeit der organischen Substanz führt (vgl. Kapitel 4.4.3). Grundsätzlich hat der Druck hierbei keinen entscheidenden ursächlichen Anteil am Substrataufschluss (vgl. Kapitel 3.2.3). Durch zusätzliche Temperatureinwirkung kann jedoch eine Schwächung der organischen Strukturen erwartet werden. In diesem Fall könnten veränderte Drücke einen weitergehenden Substrataufschluss begünstigen (vgl. Kapitel 4.4.3, insbesondere: Radke [2000]; Schieder et al. [2000]).

Unter den Bedingungen einer raschen Druckänderung im Dampfexplosionsverfahren kommt es zu einem schlagartigen Verdampfen des Wassers im Substrat, was

zu einem deutlich erhöhten Aufschluss in organischen Substraten führt. Hierdurch kann ein verbesserter Zugang der Enzyme zum Substrat erreicht werden (vgl. Kapitel 4.4.3). Ein Nachteil der beschriebenen Hochdruckverfahren ist der hohe Bedarf an thermischer Energie – insbesondere aufgrund der dort verwendeten hohen Temperaturen. Auf Abfallbehandlungsanlagen steht nach Erfahrung des Autors zumeist Abwärme im Bereich 80 - 120 °C in nennenswertem Umfang zur Verfügung. Gutzwiller [2009] und Keil et al. [2005] geben 90 °C für den Vorlauf des Motorkühlwassers und 450 °C für den Abgaswärmetauscher an. Auf großtechnischen Vergärungsanlagen werden lediglich etwa 20 % der Abwärme als Prozesswärme zur Beheizung des Fermenters benötigt [Baumann, 2010]. Es erscheint daher sinnvoll, eine alternative Verfahrenskombination zu finden, die unter Nutzung dieser Abwärme zu einem möglichst effektiven Stoffaufschluss führt. Aus betrieblichen Erfahrungen ist bekannt, dass es insbesondere bei trockenen (stapelfähigen) Substraten im Falle einer Erwärmung von deutlich über 50 °C zu starken Proteininkrustationen und somit Verbackungen der Wärmetauscher kommt. Durch die Vermeidung hoher Behandlungstemperaturen könnten derartige betriebliche Probleme und damit einhergehende Beanspruchungen der Bauteile vermieden werden. Ob das im Rahmen dieser Arbeit erforschte Verfahren der Vakuum-Siede-Behandlung auch in diesen niedrigen Temperaturbereichen wirksam ist, war Gegenstand der Untersuchungen.

Die Versuche von Amon [2006]; Füleký und Czinkota [1993] deuten darauf hin, dass auch bei niedrigeren Temperaturen und hiermit korrespondierenden geringeren Druckgradienten als bei klassischen Dampfexplosionsverfahren oder Thermodruckhydrolysen üblich, signifikante Erhöhungen der anaeroben Abbauraten und damit höhere Gasbildungsraten möglich sind.

Die Annahme ist daher, dass durch Temperaturen im Bereich der zur Verfügung stehenden Abwärme und einen (ggf. mehrfachen) Druckwechsel im Verlauf der zu untersuchenden Vakuum-Siede-Extraktion ein erhöhter Substrataufschluss erreichbar ist. Dies gilt insbesondere für den Fall, dass eine rasche Absenkung des Drucks bei zuvor erwärmten Material (über der Siedetemperatur des angestrebten Drucks) gelingt. Durch eine im Verlauf der Vakuum-Behandlung auftretende Entgasung wird zusätzlich von einer Verbesserung der Kontaktflächen zwischen Substrat und Enzym während des anschließenden anaeroben Abbauvorganges ausgegangen. Auch eine Veränderung des Zellverbandes und der Zellen selbst sowie komplexer organischer und anorganischer Verbindungen könnten in einem gewissen Umfang möglich sein.

Da eine Erhöhung der biologischen Verfügbarkeit üblicherweise mit einer Erhöhung der Extrahierbarkeit in eine flüssige Phase einhergeht, liegt es nahe, den Verfah-

rensschritt der Extraktion mittels einer Trennung der verbleibenden Feststoffe von einer organisch angereicherten Flüssigphase in die zu untersuchende Verfahrenskombination einzubeziehen. Aus zahlreichen bereits aufgeführten Arbeiten (vgl. Kapitel 4.4.3) ist bekannt, dass Cellulose und insbesondere Hemicellulose bei hohen Temperaturen (110 - 180 °C) aufgeschlossen werden und zu erheblichen Teilen in Lösung gehen. Diesen Effekt gilt es mittels günstiger Prozessbedingungen zu verstärken.

Eine Überführung gelöster organischer Verbindungen in eine Flüssigphase ermöglicht die Nutzung von Hochleistungsfermentern, beispielsweise nach dem UASB-Prinzip oder sogenannte Hybridreaktoren, die bei kürzeren Verweilzeiten und hohen Raumbelastungen einen effektiven Stoffumsatz leisten (vgl. Kapitel 3.3).

Ein positiver Aspekt einer Fest-Flüssig-Trennung, etwa durch eine Pressentwässerung, ist die Einbringung mechanischer Energie auf das zuvor vakuum-siede-behandelte Substrat. Die anaerobe Bioverfügbarkeit organischer Stoffe wird positiv beeinflusst, wenn eine mechanische Beanspruchung deren mikrobielle Hydrolyse unterstützt (vgl. Kapitel 4.4 und besonders Mundhenke [2002]). Dies gilt insbesondere für eine quetschende Zerkleinerung, wie sie in vielen Pressaggregaten erreicht wird.

Mit dem Forschungsansatz der vorliegenden Arbeit wurde das Ziel verfolgt, Grundlagen für die Entwicklung eines energie- und kosteneffizienten Verwertungs- und Behandlungsverfahrens für gezielt angebaute Energiepflanzen, landwirtschaftliche Abfallprodukte und Siedlungsabfälle (ggf. gemeinsam mit Klärschlämmen) bereitzustellen. Die hiermit verfolgten Zielsetzungen waren:

- Aufschluss organisch mittel und schwer verfügbarer Substrate,
- Erhöhung der Löslichkeit anaerob abbaubarer Substanzen und damit Erhöhung der Verfügbarkeit für die Biogasausbeute im Anaerobprozess,
- effiziente Energieausbeute des Gesamtsystems.

In Vorversuchen von Widmer [2001] zur Vakuum-Siede-Behandlung bei 50 mbar und einer Temperatur im Wärmetauscher von ca. 50 °C mit anschließender Extraktion (Fest-Flüssig-Trennung), deren Ergebnisse dem Autor zu Beginn des Forschungsvorhabens vorlagen, ergaben sich im Vergleich zu unbehandeltem Vergleichssubstrat deutlich höhere Extraktionsleistungen. Die Erhöhung der CSB-Fracht im Prozesswasser betrug demnach ca. 30 %.

4.5.1 Arbeitshypothesen

Das Verfahren der Vakuum-Siede-Behandlung in Verbindung mit einer anaeroben Behandlung zur Biogasgewinnung ist bisher großtechnisch nur als Prototyp realisiert.

Praxisrelevante Grundlagen und belastbare Versuchsergebnisse lagen zu Beginn der Forschungsarbeiten nicht vor.

Das Verfahren wurde auf Grundlage bereits vorliegender Ergebnisse aus unterschiedlichen Aufschlussverfahren und aufgrund orientierender Vorversuchen mit einem großtechnischen Vakuum-Siede-Trockner entwickelt (vgl. auch Kapitel 4.5). Die Vakuum-Siede-Trocknung ist am Markt bekannt, auch wenn sich diese Technologie bei der Behandlung von Abfallstoffen bisher nicht durchsetzen konnte. In einem parallel durchgeführten Forschungsvorhaben wurde erstmals die Vakuum-Siede-Behandlung zur Trocknung fester Abfallstoffe und Maissilage detailliert untersucht [Avila, 2008].

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollten die Wirkmechanismen und Prozessparameter des neuartigen Vorbehandlungsverfahrens erforscht werden, um letztendlich Grundlagen zur Entwicklung eines energie- und kosteneffizienten Verwertungs- und Behandlungsverfahrens für Siedlungsabfälle und Biomassen zu liefern. Bei erfolgreicher Umsetzung der projektierten Maßnahmen wäre das Verfahren geeignet, die Energieeffizienz von Vergärungsverfahren zu steigern und so eine nachhaltige Umweltentlastung zu schaffen. Aufgrund erster Vorversuche war von einem beschleunigten anaeroben Abbau vakuum-siede-behandelter Substrate auszugehen [Widmer, 2001].

Als Arbeitshypothese galt, dass durch die Vakuum-Behandlung unter erwärmten Bedingungen Zellstrukturen zerstört und die effektive Oberflächen organischer Substrate vergrößert werden. Der erhöhte Anteil der in eine Flüssigphase überführbaren Organik läge für einen nachgeschalteten Anaerobprozess besser verfügbar vor. Es wurde angenommen, dass hierdurch der zumeist geschwindigkeitsbestimmende Schritt der Hydrolyse (s. Kapitel 3.1.2) durch die Vakuum-Siede-Behandlung – zumindest teilweise – vorweggenommen bzw. unterstützt wird. Ein derartiger Effekt würde zu verkürzten Verweilzeiten in der Anaerobstufe führen. Die mit Organik angereicherte Flüssigphase wäre für eine effektive Vergärung mittels Nassvergärungsverfahren in Hochleistungsfermentern (z.B. UASB-Reaktoren) geeignet und somit ein höherer Biogasertrag als bei konventionellen Verfahren erreichbar.

Kapitel 5

Material und Methoden

5.1 Allgemeine Anmerkungen

Der praktische Teil der vorliegenden Arbeit basiert auf großtechnischen, halbertechnischen und labortechnischen Versuchen. Die Struktur der Versuchsabfolge war aufgrund eines Forschungsauftrages vorgegeben, aus dem die Fragestellung der vorliegenden Arbeit abgeleitet wurde. Die Durchführung und Finanzierung der Forschungsarbeit an der großtechnischen und halbertechnischen Versuchsanlage wäre zu einem späteren Zeitpunkt – nach Abschluss labortechnischer Versuche – nicht möglich gewesen. Darüber hinaus ergaben sich aus den großtechnischen Versuchen einigen wesentliche Fragestellungen. Das vorliegende Kapitel beschreibt zunächst die Versuchsanlagen und die Versuchsdurchführung entsprechend der oben aufgezeigten Versuchsabfolge. Zugeordnet sind die verwendeten Versuchssubstrate und die angewandten Probenahmen. Die Analyse- Mess- und Berechnungsmethoden bilden den Abschluss des Kapitels (Kapitel 5.5).

5.2 Großtechnische Versuche

5.2.1 Zielsetzung

Die Untersuchungen an der großtechnischen Anlage dienten in erster Linie der Überprüfung der Funktionsfähigkeit der gewählten Verfahrenstechnik und wurden auf ausdrücklichen Wunsch des Auftraggebers vorgezogen. Das Verfahren konnte in seinen wesentlichen Funktionsbereichen orientierend untersucht und erprobt werden. Die Versuchsergebnisse und Messwerte liefern Anhaltswerte für den energetischen Aufwand des Verfahrens im großtechnischen Betrieb. Vor- und nachgelagerte Prozessstufen konnten – wenn überhaupt – nur eingeschränkt betrachtet werden.

5.2.2 Beschreibung der Versuchsanlage

Die ursprünglich für die Erforschung der Vakuum-Siede-Trocknung konzeptionierte Anlage (vgl. Avila [2008]) der ISKA GmbH und der U-plus Umweltservice AG war auf dem Gelände der Deponie Sansenhecken, Neckar-Odenwaldkreis installiert. Diese wurde von den beteiligten Firmen in Kooperation mit der AWN-Abfallwirtschaftsgesellschaft des Neckar-Odenwald-Kreises mbH unter wissenschaftlich technischer Begleitung der Technischen Universität Braunschweig, Abteilung Abfall- und Ressourcenwirtschaft betrieben. Den schematischen Aufbau der wesentlichen Komponenten der Versuchsanlage und den Prozessablauf des Vorbehandlungsverfahrens zeigt die Abbildung 5.1. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde lediglich die Vakuum-Siede-Extraktion betrachtet. Die Untersuchung der ebenfalls abgebildete Vakuum-Siede-Trocknung erfolgte in einem gesonderten Forschungsvorhaben [Avila, 2008].

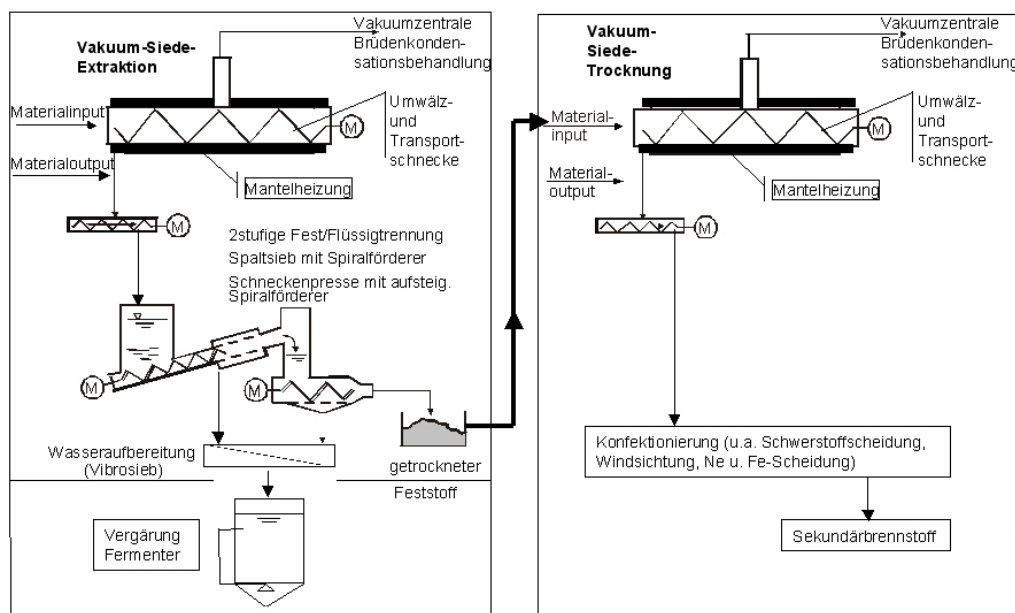


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung der großtechnischen Anlage zur Vakuum-Siede-Extraktion und -Trocknung

Die großtechnische Versuchsanlage besteht im Wesentlichen aus einem Vakuum-Reaktor mit einer Heizanlage, einer Vakuumpumpe und zwei Kondensatoren. Der Vakuum-Reaktor weist einen Durchmesser von 70 cm und eine Länge von 800 cm auf (Abbildung 5.2). Pro Versuchsdurchgang kann eine Substratmasse von ca. 600 - 800 kg behandelt werden. Das Substrat wird während des Versuchs durch einen

Schneckenförderer mechanisch umgewälzt. Beladung und Entladung des Reaktors erfolgen mittels Schneckenförderern, die Wärmezufuhr über eine an der Außenwand des Reaktors angelegte Mantelheizung. Die Heizanlage wird durch Heizöl befeuert. Das Vakuum wird durch eine Wasserringvakuumpumpe über einen Brüdenom am Reaktorscheitel aufgebaut, wodurch auch die Brüden aus dem Reaktor abgeführt und zu zwei Kondensatoren geleitet werden. Die großtechnische Versuchsanlage erfolgte im Umlaufbetrieb (Kreislaufführung des Substrates durch Reaktorröhre und parallel liegende Rücklauffröhre) betrieben, sodass das Substrat durch die installierten Schneckenförderer durch den Versuchsreaktor transportiert wurde.

Der in der Abbildung 5.1 ebenfalls abgebildete Anaerobfermenter war nicht Teil der tatsächlich betriebenen Versuchsanlage, sondern soll lediglich die geplante Einbindung in das Gesamtkonzept andeuten.

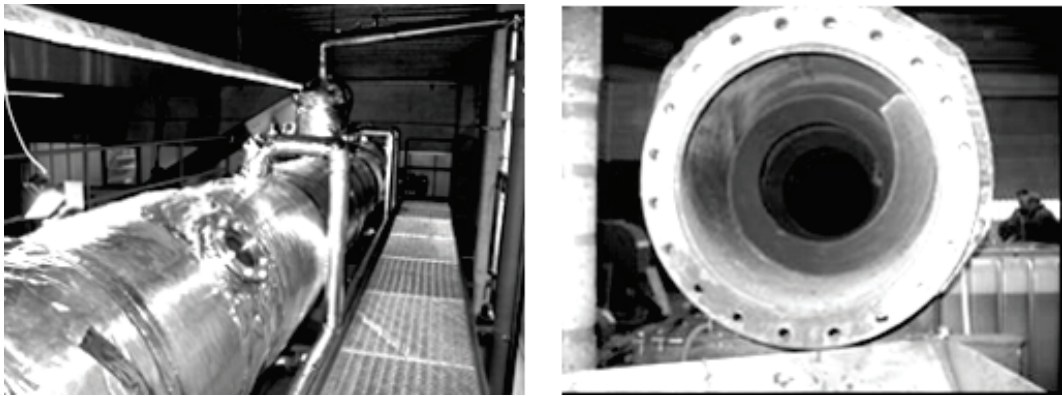


Abbildung 5.2: Großtechnische Versuchsanlage: Vakuum-Siede-Reaktor und Innenraum des Reaktors mit Schneckenförderer

5.2.3 Untersuchte Substrate

Auf dem Entsorgungszentrum standen frisch angelieferte Haushaltsabfälle zur Verfügung. In der an das Entsorgungszentrum angeschlossenen Gebietskörperschaft war keine Getrenntsammlung biologischer Abfälle (Biotonne) installiert, sodass die Haushaltsabfälle einen vergleichsweise hohen Organikanteil aufwiesen. In den Vorversuchen wurden die Siebfraction < 60 mm dieses Hausmülls und Maissilage (Faserlänge ca. 4 mm) untersucht.

Die Siebfraction < 60 mm wurden vor den VSE-Versuchen unterschiedlich lange und intensiv aerob vorbehandelt, um eine Erwärmung des Substrates und möglicherweise eine kurze aerobe Hydrolyse zu erreichen. Die Maissilage wurde von einem regionalen Landwirt bezogen, direkt nach Abstich aus der Lagermiete zur Versuchs-

anlage transportiert und verarbeitet. Detaillierte Eingangsdaten zum Substrat oder der verwendeten Silierungsmethode wurden aufgrund des Vorversuchsstadiums nicht erhoben und abgefragt.

5.2.4 Versuchsdurchführung

Das Substrat wurde über eine Befüllvorrichtung aufgegeben und für einen definierten Zeitraum einer Vakuum-Siede-Behandlung unterzogen. Hierzu wurde das Material über die Mantelheizung erwärmt und im Reaktor ein definierter Unterdruck gegenüber Normaldruck aufgebaut.

Nach der Vakuum-Siede-Behandlung wurde das aufgeschlossene Substrat mit spezifischen Volumina an Wasser vermischt, das angemischte Substrat nach 30 - 60 minütigem beheizten Maischprozess aus dem Reaktor ausgetragen und einer ein- bis zweistufigen Fest-Flüssig-Trennung zugeführt. Hierfür kamen eine Vorpresse mit Schneckenförderer und Siebkorb (1,0 mm Spalt, freier Querschnitt $0,62\text{ m}^2$, Eigenanfertigung des Anlagenherstellers) und eine Schneckenpresse (6,0 mm Spalt, freier Querschnitt $0,25\text{ m}^2$, Fa. Kufferath) zum Einsatz. Die Versuchsdurchführung ist schematisch in der Abbildung 5.3 dargestellt.

Zur ersten Beurteilung der Leistungsfähigkeit der Vakuum-Siede-Extraktion war das Analytikprogramm aufgrund des Zeit- und Kostenplans limitiert. Zur Beurteilung des Verfahrens wurden daher zunächst folgende Kriterien definiert:

- Technische Funktionsfähigkeit,
- Extraktionsleistung und Behandlungsdauer auf Basis der CSB-Extraktion (Überführung CSB-relevanter Fraktionen aus dem Feststoff in die Flüssigphase),
- Abluftmenge,
- Kondensatqualität,
- Energiebedarf.

Für die organische Belastung der Proben der In- und Outputsubstrate wurde zunächst die extrahierte CSB-Fracht als Summenparameter herangezogen. Dieser ermöglicht eine quantitative Aussage über die Konzentration oxidierbarer Inhaltsstoffe der Proben. Der CSB kann als Energieparameter gedeutet werden [ATV, 1993]. Eine einfache und überprüfbare Bilanzierung über den CSB ist daher – anders als zum Beispiel bei dem Parameter TOC – möglich [ebd.]. Ungenauigkeiten ergeben sich metho-

denbedingt durch die Mit-Oxidation anorganischer Verbindungen, wie beispielsweise Sulfiden [ebd.].

Die Anlage ist mit einer computergestützten Steuer- und Messeinheit versehen (Mess- und Probennahmepunkte siehe Abbildung 5.4 und Tabelle 5.1). Zusätzlich zu den in der Abbildung 5.4 aufgezeigten Messungen wurde der Gesamtenergieverbrauch der Anlage im Betriebszeitraum erfasst. Folgende Parameter werden von der elektronischen Datenaufnahme erfasst:

- Vorlauf-, Rücklauftemperatur und Durchsatz Heizwasser,
- Vorlauf-, Rücklauftemperatur und Durchsatz der einzelnen Kühlwässer,
- Temperatur Brüdenabzug,
- Druck Brüdenabzug,
- Druck Vakuumpumpe,
- Abgasvolumen (aufgrund falsch dimensionierter Messeinheit nur grob) und
- Energieverbrauch elektrisch.

Tabelle 5.1: Messungen, Probennahmen und Analysen, großtechnische Versuche

Untersuchtes Substrat	Analysen und Messungen
Substrat-Input vor Vakuum-Siedebehandlung	Masse FS, Stückgrößenverteilung, TS, visuelle Beschreibung
Substratoutput nach Vakuum-Siedebehandlung und Extraktion	Masse FS, TS, visuelle Beschreibung
Extraktionswasser (Pressat)	Masse FS, TS, CSB,
Kondensate	Masse FS, TS, CSB
Massen- und Stoffbilanzen, Verbräuche, Verfahrens- und Prozesskenngrößen u.a. Temperaturen, Drücke	Messpunkte siehe Abbildung 5.4

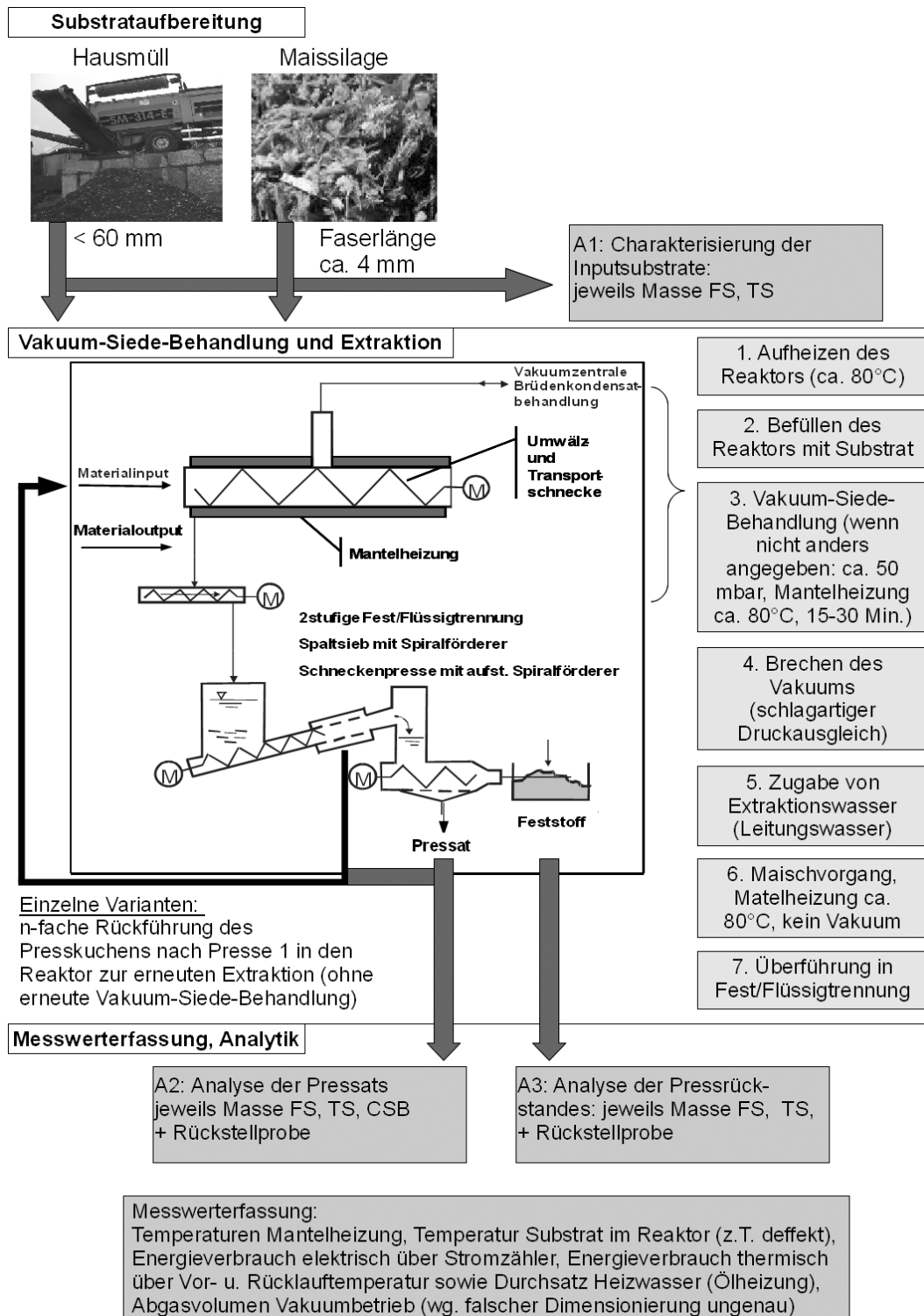


Abbildung 5.3: Versuchsdurchführung großtechnische Versuche

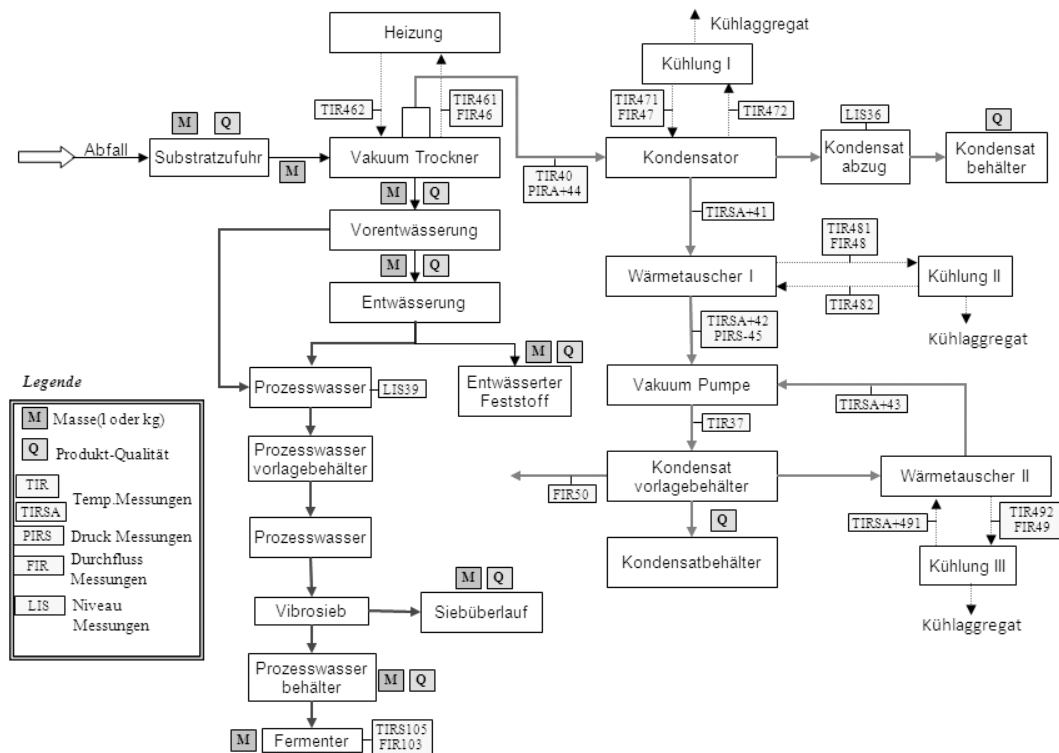


Abbildung 5.4: Schematische Darstellung der Mess- und Probennahmestellen - großtechnische Anlage

5.2.5 Probennahme, -aufbereitung und -lagerung

Die Fest- und Flüssigproben wurden, soweit dies möglich war, direkt an Abwurfschächten und Übergabepunkten aus dem Substratstrom in angepassten Zeitintervallen als Stichproben entnommen und später in Anlehnung an die DIN 38402-30 [1998] und DIN EN 932-1 [1996] zu einer Mischprobe vereint. Die Flüssigproben umfassten pro Probe 2 Liter. Die Proben wurden direkt nach der Entnahme bis zur weiteren Verwendung und Analyse je nach Dauer gekühlt oder tiefgefroren gelagert.

5.2.6 Versuchsvarianten

Die gewählten Versuchsvarianten bilden Bedingungen einer möglichst intensiven Behandlung im Sinne des Verfahrensansatzes ab (Tabelle 5.2). Geringere Unterdrücke waren mit den zur Verfügung stehenden Aggregaten nicht erreichbar. Die Temperaturen liegen in einem Bereich, der mit Abwärme – wie sie auf zahlreichen Abfallbehandlungsanlagen zur Verfügung steht – erreichbar ist (vgl. Kapitel 4.5).

Aufgrund des Pilotcharakters der Anlage kam es immer wieder zu Anpassungen

einzelner Aggregate und insbesondere die Dichtigkeit betreffend zu erheblichem Verschleiß. Die Zwischenlagerung der Hausmüllsubstrate von der Anlieferung und Absiebung bis zur Versuchsdurchführung erfolgte für die Versuchsvarianten HM5080-1 und HM5080-2 auf einer abgedeckten Miete. Die Substrate für Variante HM5080-3 und HM10080 wurden in einer Holzkiste (ca. 1 m^3) zwischengelagert und hierin ca. 24 h vor Versuchsbeginn leicht von unten druckbelüftet. Hierdurch kam es zu einer Vorerwärmung des Substrates auf 35 - 50°C. Weiterhin können erste aerobe Hydrolyseprozesse angenommen werden.

Tabelle 5.2: Versuchsvarianten großtechnische Versuche)

Varianten	HM5080-1	HM5080-2	SI5070	HM5080-3	HM-10080
Substrat	Hausmüll	Hausmüll	Maissilage	Hausmüll	Hausmüll
Masse [kg]	558	466	393	803	679
Trockensubstanz [%]	56,5	54,2	28,8	54,6	51,9
Temperatur in Mantelheizung [°C]	80	80 - 85	70	80	80
Unterdruck absolut VSB [mbar]	50	50	50	50	100
Extraktionsgänge	1	1	1	2	3
Rückführung Presskuchen nochmalige Extraktion [kg]				b) 734	b) 676 c) 692
Behandlungszeit VSB	30 Min.	30 Min.	15 Min.	30 Min.	30 Min.
Maische	60 Min.	60 Min.	60 Min.	a) 30 Min. b) 35 Min.	a) 45 Min. b) 45 Min. c) 55 Min.
Wasserzugabe Maische [l]	300	250	400	a) 400 b) 350	a) 350 b) 350 c) 250

5.3 Halbtechnische Versuche

5.3.1 Zielsetzung

Die halbtechnischen Versuche dienen der Untersuchung der Wirksamkeit relevanter Parameter im Prozessverlauf. Das Hauptaugenmerk lag hierbei auf der Verfahrenskombination von Vakuum- und Wärmebehandlung. Die in Reihenversuchen untersuchten Versuchsvarianten sollten eine Aussage darüber zulassen, ob mit vakuum-siede-behandelten Substraten signifikant bessere Extraktionsergebnisse und damit Gasbildungsraten erreichbar sind. Zusätzlich konnten die Auswirkungen weiterer potenzieller Prozessparameter untersucht werden. Hierzu wurden mehrere Versuchsreihen mit Maissilage und Bioabfall durchgeführt. Ergänzt werden die Reihenuntersuchungen durch Zusatzversuche zu den erzeugten Pressaten.

5.3.2 Beschreibung der Versuchsanlage

Nach den ersten Erfahrungen mit der großtechnischen Versuchsanlage wurde im Rahmen dieser Arbeit in Kooperation mit der ISKA GmbH eine Versuchsanlage im halbtechnischen Maßstab entworfen und konstruiert. Eine schematische Darstellung der Komponenten und Messeinrichtungen der Vakuum-Siede-Behandlung zeigt die Abbildung 5.5. Die Aufstellung der Anlagenteile in der Versuchshalle sind auf der Abbildung 5.6 wiedergegeben; den Massenstrom durch die Anlagenkomponenten zeigt die Abbildung 5.7. Die wesentlichen Komponenten der Anlage sind:

- Mischer/Extraktor: Doppelwellenmischer (gegenläufige Wellen) mit installiertem Heizmantel und Isolationsschicht zur Anmaischung nach Vakuum-Siede-Behandlung; Innenlänge 250 cm, Innendurchmesser 40 cm.
- Vakuum-Reaktor zur Vorbehandlung des eingesetzten Substrates unter Vakuum (bis 50 mbar) und Wärme (bis 105°); Reaktor mit Heizmantel und Isolationsschicht umgeben; Verschluss schwenkbar und durch Befüll-/Entleervorrichtung zu ersetzen; Vakuum über Vakuum-Controller (Modell VNC1, Fa. Vacuubrand) gesteuert; Innenlänge Reaktor: 290 cm, Innendurchmesser Reaktor: 40 cm; innenliegende Transportschnecke mit Überwurfbblechen für Reversionsbetrieb.
- Drehschieber-Vakuumpumpe, Modell R50025-0100E, Fa. Busch, angeschlossen über Kondensator.
- Heizungsanlage: Programmierbare Elektroheizung (Modell 300, Fa. Regoplas) mit Thermoöl als Heizmedium.

- Kondensator für austretende Brüden, inkl. Kondensatsammelbehälter, angeschlossen an separates Kühlaggregat, mit Vakuum-Reaktor verbunden über Rohrleitung zum Brüdendom.
- Fest-Flüssig-Trennung: hydraulische Stempelpresse (Eigenbau mit 2-Wege-Hydraulikstempel, Siebkorb 8 mm Lochweite); Schneckenpresse (Modell Akupress A 250, Fa. Andreas Kufferath GmbH & Co. KG, Dimensionierung: siehe Abbildung 5.8).
- Steuer und Bedieneinheit zur Anlagensteuerung und Messdatenerfassung.

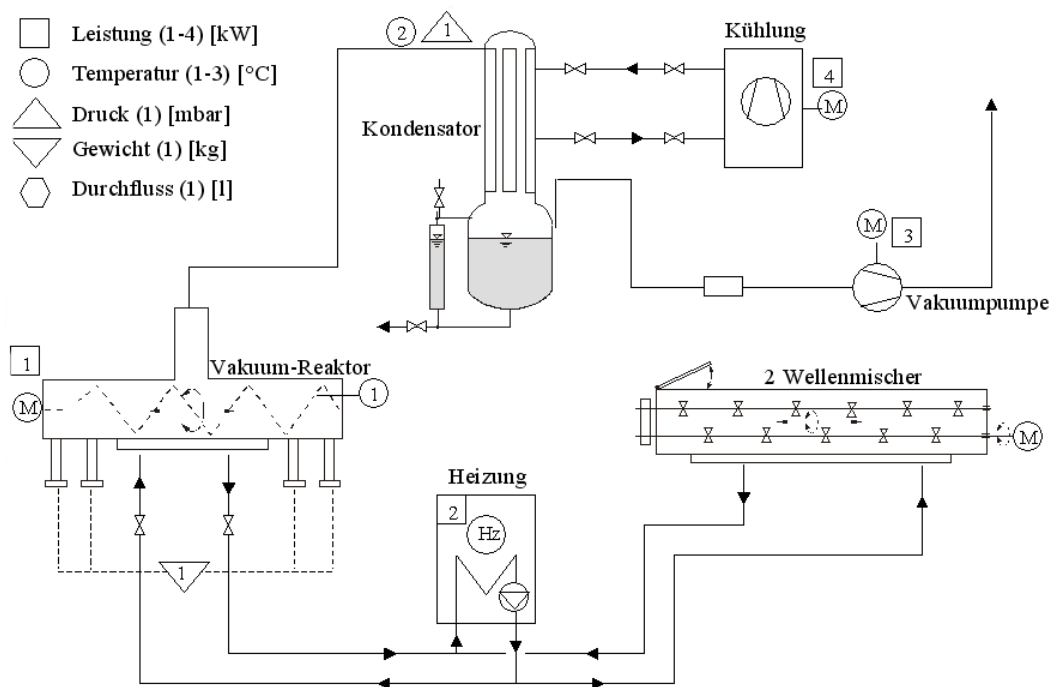


Abbildung 5.5: Schematische Darstellung der halbtechnischen Versuchsanlage, Komponenten und Messeinrichtungen

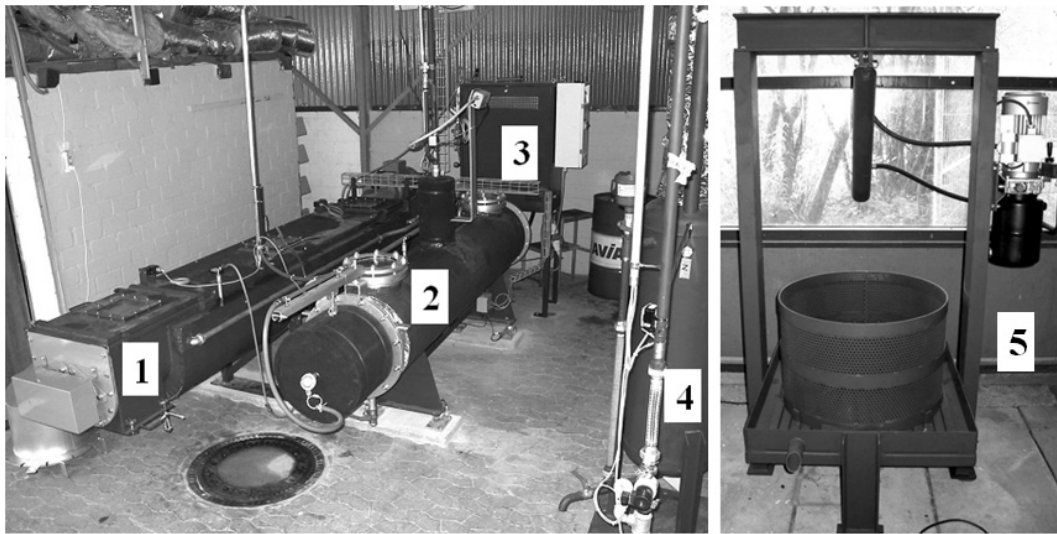


Abbildung 5.6: Halbtechnischen Versuchsanlage; 1: Mischer/Extraktor, 2: Vakuum-Reaktor, 3: Heizungsanlage, 4: Kondensator, 5: Stempelpresse

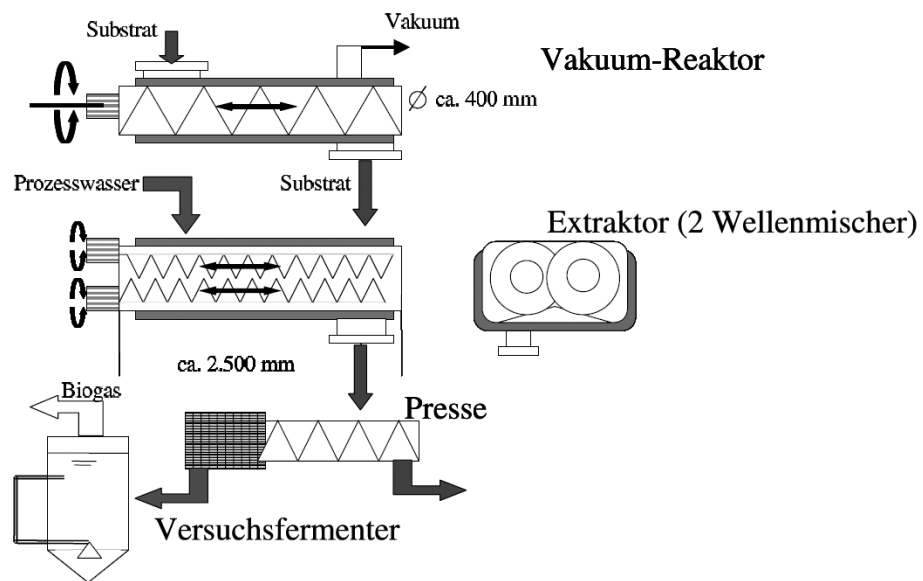


Abbildung 5.7: Massenfluss der eingesetzten Substrate durch die Komponenten der Versuchsanlage - schematisch

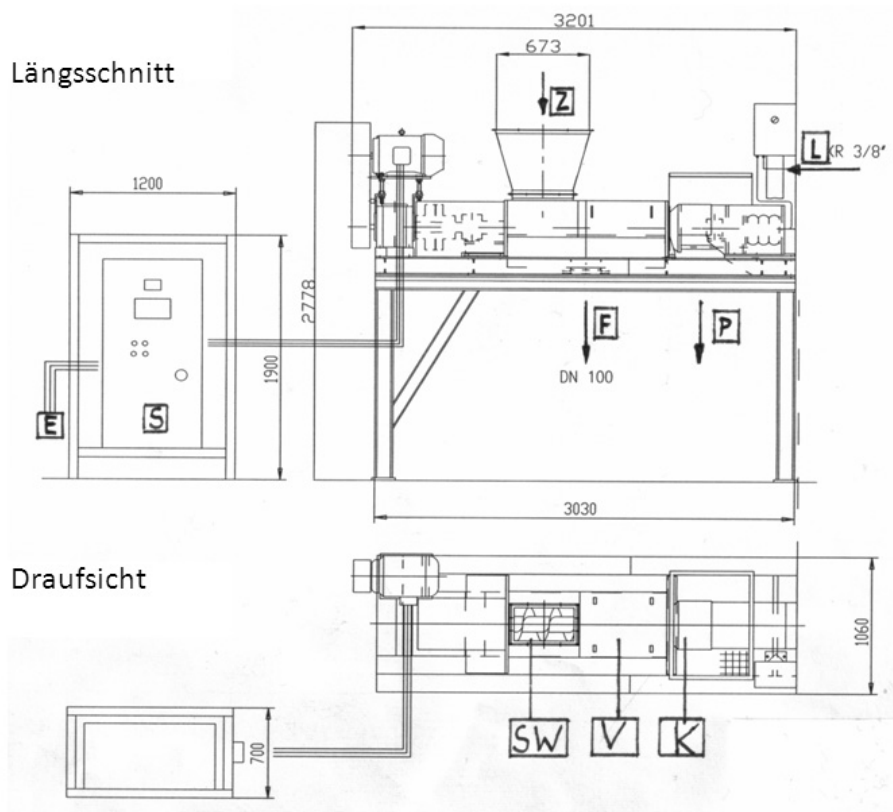


Abbildung 5.8: Schematische Darstellung der verwendeten Schneckenpresse

5.3.3 Untersuchte Substrate

Als Substrate kamen Maissilage und Bioabfälle zum Einsatz, wobei der weitaus größere Anteil der Versuche mit Maissilage erfolgte, da dieses Substrat ein höheres Maß an Homogenität aufweist sowie über längere Zeiträume in nahezu gleichbleibender Qualität und ausreichender Masse verfügbar ist. Die in Bioabfällen auftretenden Schwankungen erschweren die Identifikation von Wirkzusammenhängen und führen zu größeren Streuungen der Messwerte innerhalb der Versuchswiederholungen. Die Maissilage, hergestellt ohne Siliermittel, wurde von der landwirtschaftlichen Versuchseinrichtung Johann Heinrich von Thünen-Institut in Braunschweig bezogen.

Im Verlauf der Versuche mit Bioabfall kamen zwei verschiedene Bioabfall-Chargen zur Anwendung. Zuerst wurde unbehandeltes Ausgangssubstrat von der lokalen Bioabfallvergärungsanlage Watenbüttel verwendet. Dieser Bioabfall wies einen hohen Anteil an Strauchschnitt und große Inhomogenität auf.

Für den zweiten Versuchsdurchlauf wurden die verwendeten Bioabfälle direkt aus städtischen Bioabfalltonnen wenige Stunden vor der Leerung durch den Entsor-

gungsbetrieb entnommen und anschließen mit einer Grobmühle (Fa. JBF Maschinen GmbH) auf eine Korngröße von etwa 3 cm zerkleinert und homogenisiert.

Eine genauere Charakterisierung der Ausgangssubstrate erfolgt im Ergebnisteil in den Tabellen 6.5 (Seite 120) und 6.12 (Seite 141).

5.3.4 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung ist schematisch in der Abbildung 5.9 dargestellt. Anfallende Brüden wurden dem Prozesswasser zum Anmaischen zugegeben. Die durchgeführten Messungen, Probennahmen und Analysen sind in der Tabelle 5.3 aufgeführt.

Die Fest-Flüssig-Trennung mittels der Stempelpresse musste aufgrund des begrenzten Füllvolumens des Presskorbes in mehreren Chargen vorgenommen werden. Die erfassten Pressatmassen wurden später auf die gesamte Outputmasse der Vorbehandlung bezogen. Die Probenahme für die TS-Bestimmung des Pressrückstandes erfolgte nach gründlicher Homogenisierung und Probeneinengung aus dem am Versuchsende zusammengeführten Pressrückstand.

Aufgrund der Bau- und Betriebsweise der Schneckenpresse war es, insbesondere bei intensiv behandelten Versuchssubstraten notwendig, vor der eigentlichen Entwässerung mittels vorgelegter Rohsubstrate einen Presszapfen im Konus der Presse zu erzeugen. Dieser wurde bei der Beprobung und Erfassung der Massenströme rechnerisch berücksichtigt. Die Geschwindigkeit der Pressschnecke wurde auf 12 Umdrehungen pro Minute eingestellt. Für die Versuche mit Maissilage wurde als Gegendruck des Konus 5 bar, für die Versuche mit Bioabfällen 3,5 bar gewählt. Vorversuche ergaben für diese Einstellungen die besten Resultate für die Fest-Flüssig-Trennung.

Der Energieverbrauch der einzelnen Verfahrensschritte wurde mit im Betriebssystem installierten elektronischen Energieverbrauchszählern (Modell Elcontrol vip one, Fa. Elcontrol Energy) gemessen und mit der Software DASyLab erfasst.

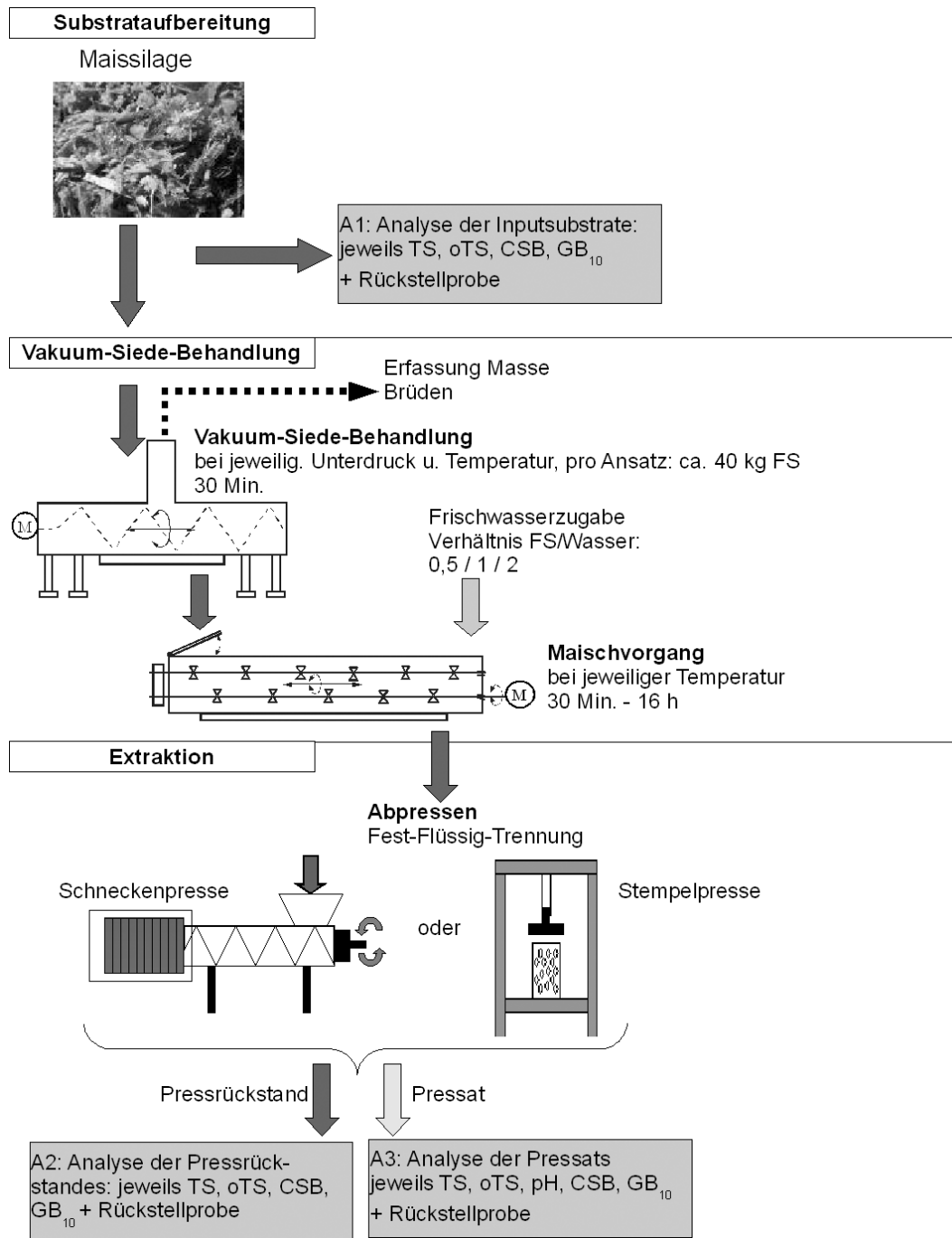


Abbildung 5.9: Versuchsdurchführung halbtechnische Versuche

Tabelle 5.3: Messungen, Probennahmen und Analysen, halbtechnische Versuche

Untersuchtes Substrat	Analysen und Messungen
Substrat-Input vor Vakuum-Siedebehandlung	Masse, TS, oTS, CSB_{fest} , Gasbildung
Vakuum-Siede-Behandlung	Energieverbrauch, Druck, Temperatur
Substrat nach Vakuum-Siedebehandlung	Masse
Brüden	Masse
Anmaischprozess	Energieverbrauch, Temperatur, Masse zugeführtes Extraktionswasser
Substratoutput nach Maischvorgang	Masse
Presskuchen nach Fest-Flüssig-Trennung	Masse, TS, oTS, Gasbildung
Pressat nach Fest-Flüssig-Trennung	Masse, TS, oTS, CSB, pH, Gasbildung

5.3.5 Probennahme, -aufbereitung und -lagerung

Das Input-Substrat wurde in größeren Chargen bezogen bzw. erfasst und zwischen den einzelnen Versuchsdurchgängen gekühlt gelagert.

Die Fest- und Flüssigproben wurden – soweit möglich – in Stichproben aus dem Substratstrom entnommen und später zu einer Mischprobe vereint. Dies war bei der Entnahme aus den Reaktoren oder aus dem Pressatabwurf der Schneckenpresse möglich. Presswasserproben konnte lediglich aus einer zuvor erfassten Grundgesamtheit des Presswassers im Sammelbehälter entnommen werden. Ansonsten erfolgte das Vorgehen analog zu den großtechnischen Versuchen (vgl. Kapitel 5.2.5)

5.3.6 Versuchsvarianten

Die durchgeführten Versuchsvarianten für die Versuche mit Maissilage sind in der Tabelle 5.4, die Versuchsvarianten mit Bioabfall in der Tabelle 5.5 aufgeführt.

Tabelle 5.4: Versuchsvarianten halbtechnische Versuche - Maissilage

Versuch	Massenverhältnis	Vakuum-Siede-Behandlung			Maische		Presse
	Wasser/Silage	[mbar]	[°C]	[min]	[°C]	[min]	
St0000/00	1/1	-	-	-	-	30	Stempel
St0000/50	1/1	-	-	-	50	30	Stempel
St0000/90	1/1	-	-	-	90	30	Stempel
St5040/00	1/1	50	40	30	-	30	Stempel
St5040/90	1/1	50	40	30	90	30	Stempel
St5090/00	1/1	50	90	30	-	30	Stempel
St5090/90	1/1	50	90	30	90	30	Stempel
St0000/00-0,5	1/2	-	-	-	-	30	Stempel
St0000/00-2	2/1	-	-	-	-	30	Stempel
St-UB	1/1	-	-	-	-	-	Stempel
Sc0000/90	1/1	-	-	-	90	30	Schnecke
Sc5040/00	1/1	50	40	30	-	-	Schnecke
Sc5040/90	1/1	50	40	30	90	30	Schnecke
Sc5090/00	1/1	50	90	30	-	-	Schnecke
Sc5090/90	1/1	50	90	30	90	30	Schnecke
Sc-UB	1/1	-	-	-	-	-	Schnecke
Sc0000/00-2	2/1	-	-	-	-	30	Schnecke
Sc0000/90-2	2/1	-	-	-	90	30	Schnecke
Sc5040/50-2	2/1	50	40	30	50	30	Schnecke
Sc5090/00-2	2/1	50	90	30	-	30	Schnecke
Sc5090/90-2	2/1	50	90	30	90	30	Schnecke
Ma00-120	2/1	-	-	-	-	120	Schnecke
Ma00-360	2/1	-	-	-	-	360	Schnecke
Ma00-960	2/1	-	-	-	-	960	Schnecke
Ma50-120	2/1	-	-	-	50	120	Schnecke
Ma50-360	2/1	-	-	-	50	360	Schnecke
Ma50-960	2/1	-	-	-	50	960	Schnecke
Ma90-120	2/1	-	-	-	90	120	Schnecke
Ma90-360	2/1	-	-	-	90	360	Schnecke

Die unbehandelten Versuchsvarianten (St-UB und Sc-UB) unterlagen einer einfachen händischen Mischung der frischen Maissilage mit Wasser in einer unbeheizten Wanne.

Tabelle 5.5: Versuchsvarianten halbtechnische Versuche - Bioabfall

Versuch	Massenverhältnis	Vakuum-Siede-Behandlung			Maische		Presse
	Wasser/Abfall	[mbar]	[°C]	[min]	[°C]	[min]	
WA0000/00-2	2/1	-	-	-	-	30	Schnecke
WA0000/90-2	2/1	-	-	-	-	60	Schnecke
WA0000/90	1/1	-	-	-	-	60	Schnecke
WA5090/90	1/1	50	90	40	90	60	Schnecke
BS0000/00-2	2/1	-	-	-	-	30	Schnecke
BS0000/00-2b	2/1	-	-	-	-	120	Schnecke
BS0000/50-2	2/1	-	-	-	50	30	Schnecke
BS0000/90-2	2/1	-	-	-	90	30	Schnecke

Die Versuche mit den Bioabfällen haben lediglich orientierenden Charakter. Zusätzlich projektierte Versuchsvarianten konnten nicht mehr umgesetzt werden, da die entlehene Schneckenpresse kurzfristig nicht mehr zur Verfügung stand.

5.3.7 Zusatzversuche mit Pressaten - Maissilage und Bioabfall

Aufgrund zum Teil erheblicher Schwankungen in den GB_{10} -Analysen und im Verlauf der Reihenversuche gewonnener Ergebnisse, die auf Einflüsse des Vorbehandlungsverfahrens auf das Verhältnis $CSB_{gelöst}/CSB_{gesamt}$ schließen lassen (vgl. Kapitel 6.2.9), wurden weitere Untersuchungen zu den CSB-Werten und Gasbildungsraten der Pressate vorgenommen.

Die Bestimmung des gelösten CSB erfolgte nach Papierfiltration des Pressats.

Zur Messung der Gasbildungsraten kamen die von der Firma WTW vertriebene Druckmessköpfe OxiTop-C zum Einsatz. Der Messkopf verfügt über einen elektronischen Drucksensor nach dem Piezo-Prinzip und eine Infrarotschnittstelle zur Datenübertragung an den Controller OxiTop PC 100 (Fa. WTW). Zur Datenverarbeitung diente die Software Achat OC des selben Herstellers. Den Versuchsaufbau mit eingefüllter Probe sowie die Installation im Wärmebad zeigt Abbildung 5.10. Die Gäransätze wurden zur Vermeidung aerober Prozesse zu Versuchsbeginn mit Stickstoff gespült.

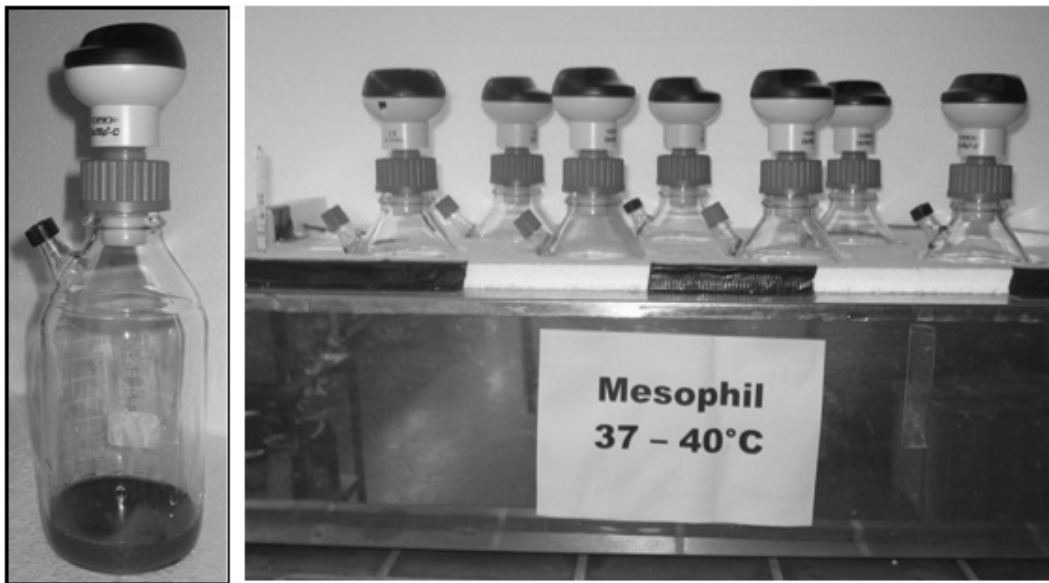


Abbildung 5.10: Versuchsaufbau der Zusatzversuche zum anaeroben Abbau der Pressate, halbtechnische Versuche

Ein Gäransatz bestand aus 40 g Inokulum (im Labor ausgefaultes Gärsubstrat einer NaWaRo-Vergärungsanlage) und 5 ml Pressat (für Wasser/Silage-Verhältnis 2/1: 10 ml). Zur Verhinderung einer Versäuerung wurde das Pressat zuvor mittels Natronlauge auf einen pH-Wert von 7,9 eingestellt. Dieses Vorgehen hatte sich in Vorversuchen mit dieser Versuchsausrüstung als geeignetes Verfahren zur Erlangung reproduzierbarer Ergebnisse erwiesen.

Da die Rückstellproben der Pressate aus den Reihenuntersuchungen für die zusätzlichen Versuche und Analysen nicht ausreichten, musste neues Pressat aus eigens durchgeführten Versuchen erstellt werden. Das Eingangssubstrat Maissilage wies identische Qualitäten und stoffliche Zusammensetzungen auf, wie das zuvor verwendete Substrat. Das Versuchssubstrat Bioabfall stammte aus der Biotonnensammlung in Braunschweig (vgl. Kapitel 5.3.3).

Zur besseren Abgrenzung sind die Versuchsvarianten nicht nach der ansonsten angewandten Nomenklatur gemäß Tabelle 5.4 und 5.5 benannt. Die Kaltmaische entspräche der Variante Sc0000/00, die Heißmaische Sc0000/90 und die Vakuum-Siede-Behandlung Sc5090/90. Für die Versuche mit Bioabfall gelten die analogen Varianten mit dem Kürzel BS. Die Durchführung erfolgte mit den Wasser/Substrat-Verhältnissen 1/1 und 2/1.

5.4 Labortechnische Versuche

5.4.1 Zielsetzung

Die labortechnischen Versuche wurden nach der Auswertung der halbtechnischen Versuchsergebnisse zur Absicherung der dort gewonnenen Erkenntnisse durchgeführt. Im Fokus der Versuchsdurchführung stand die Wirksamkeit einer Vakuum-Siede-Behandlung auf die Vergärbarkeit und Extrahierbarkeit der eingesetzten Organik. Abweichend von der bisherigen Versuchsdurchführung (großtechnisch und halbtechnisch) erfolgte weitgehend kein Eintrag mechanischer Energie. Die Gasbildungsversuche erfolgten direkt im Anschluss an die Vakuum-Siede- oder Wärmebehandlung mit dem Gesamtsubstrat ohne eine Fest-Flüssig-Trennung. Mögliche Überlagerungseffekte durch Zugabe größerer Prozesswassermengen oder sonstige zusätzliche Beeinflussungen sollten, bis auf eine Versuchsreihe, bewusst vermieden werden. Für den Großteil der Versuche kam ein eigens erstelltes Modellsubstrat zum Einsatz, das in Vorversuchen auf seine Eignung hin überprüft wurde.

5.4.2 Vorversuche zur Vergärbarkeit des Versuchssubstrates der labortechnischen Versuche

Zur Bestimmung des maximalen Gasertrages aus unbehandelten Proben des Versuchssubstrates der labortechnischen Versuche wurden vor den Vakuum-Siede-Untersuchungen Gärversuche im Batch-Ansatz durchgeführt (Abbildung 5.11). Um mögliche Beeinflussungen der Versuchsergebnisse durch den hierfür nur bedingt geeigneten Versuchsaufbau des GB₂₁-Ansatzes zu vermeiden und möglichst repräsentative Ergebnisse aus einer größeren Probenmasse zu erhalten, erfolgten die Versuche in Behältern mit ca. 20 Litern Volumen. Im Reaktorraum wurden seitlich je ein Temperaturfühler (GTF 1400 AN, Fa. Greisinger) und eine pH-Elektrode (GE 100, Fa. Greisinger) installiert. Die Erfassung des entstehenden Biogases erfolgte in Gasbeuteln und durch späteres Auslitern (Trommel-Gaszähler, Fa. Ritter, Typ TG 1). Zur Einhaltung konstanter Temperaturen wurden die Versuche in einer Klimakammer bei 30 - 33°C durchgeführt.

Die Durchmischung, Entgasung und Unterbindung von Schwimmschlammdecken in den Reaktoren erfolgte durch tägliches händisches schütteln.

Als Versuchssubstrat wurde das gleiche Material verwendet, das später auch für die labortechnischen Untersuchungen zur Vakuum-Siede-Behandlung Verwendung fand (s. Kapitel 5.4.4). Zusätzlich wurden Gärversuche mit Bioabfällen durchgeführt, die ähnlich wie in den halbtechnischen Versuchen in eigener Sammlung in städtischen

Wohngebieten erfasst, von groben Störstoffen befreit und zerkleinert wurden (ca. 30 mm). Die Untersuchungen der Gasbildungsrate mit Bioabfällen dienten dazu, die Vergärbarkeit und die Gasbildungsrate des künstlich zusammengestellten Versuchssubstrates mit denen realer organischer Abfälle zu vergleichen.

Die durchgeführten Messungen, Probennahmen und Analysen sind in der Tabelle 5.6 aufgeführt.

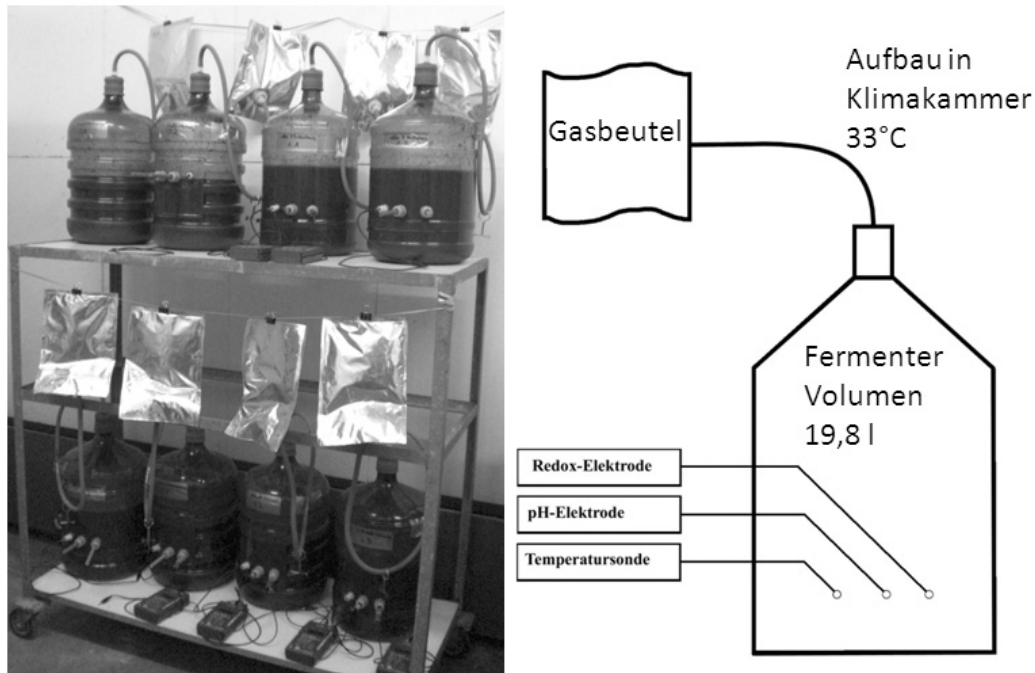


Abbildung 5.11: Versuchsaufbau der Vorversuche, labortechnische Versuche

Tabelle 5.6: Messungen, Probennahmen und Analysen, Vorversuche - labortechnische Versuche

Untersuchtes Substrat	Analysen und Messungen
Substrat-Input vor Gärversuch	Masse, TS, oTS, CSB_{fest} , TOC, van Soest Analyse
Gärversuche	Temperatur, pH, FOS/TAC, Gasvolumen, Gaszusammensetzung
Substratoutput nach Gärversuchen	Masse, TS, oTS, CSB, TOC,

5.4.3 Beschreibung des Versuchsaufbaus labortechnische Versuche

In den vorhergegangenen halbtechnischen Versuchen kam es mehrfach zu Problemen beim Überführen der Proben in andere Versuchsbehältnisse. Die Massenströme im Verlauf des Abpressvorgang konnten nicht immer mit der gewünschten Genauigkeit erfasst werden. Das Substrat wurde daher in diesem Versuchsaufbau einmalig in einer Versuchsflasche (2 Liter und 1 Liter druckfeste Schott-Glasflasche) gefüllt und erst nach Abschluss von Vorbehandlung und Gärversuch bzw. Eluierversuch zur Analyse entnommen.

Die Vakuum-Siede-Behandlung erfolgte bis auf eine Versuchsvariante ohne die zusätzliche Einbringung mechanischer Energie und bis auf diese Versuchsvariante vollständig in den selben Laborflaschen. Die Versuchsansätze wurden in einem Wasserbad auf die erforderliche Prozesstemperatur gebracht. Das Vakuum wurde durch die in den halbtechnischen Versuchen (vgl. Kapitel 5.3) eingesetzte Vakuumpumpe erzeugt. Der Reaktor mit Vakuum-Controller aus den halbtechnischen Versuchen diente als Unterdruckbehälter. Dieser war über eine Druckleitung mit Absperrventil mit dem labortechnischen Versuchsstand verbunden. Hierdurch ließ sich – anders als in den halbtechnischen Versuchen – eine schlagartige Einstellung des gewünschten Unterdrucks in den Versuchsflaschen realisieren. Der Versuchsaufbau zur Vakuum-Siede-Behandlung ist schematisch in der Abbildung 5.12 dargestellt.

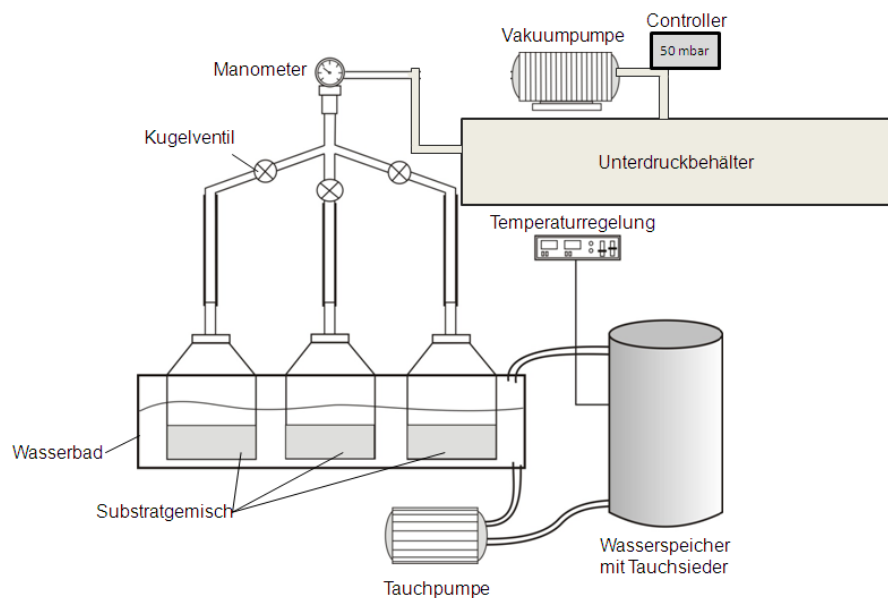


Abbildung 5.12: Schematischer Versuchsaufbau Vakuum-Siede-Behandlung, labortechnische Versuche

Für die Gärversuche wurde ein Aufbau in Anlehnung an DIN EN 11734 verwendet (Abbildung 5.13). Das gebildete Gasvolumen wurde mittels elektronischer Drucksensoren als Funktion des Gasdrucks im Gärbehälter erfasst, die Messwerte über ein eigens erstelltes Programm (LabVIEW-Programmumgebung mit Messkarte) digitalisiert und in einem angeschlossenen Rechner als zehninütiger Mittelwert in einer Datenbank gespeichert. Eine Druck- und Temperaturkompensation der Raumluft in der die Messapparatur installiert war, erfolgte anhand zusätzlich erfasster Messungen automatisch durch das Programm. Die Gärgefäße wurden in Wasserbädern auf $37^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ temperiert. Mit dem Versuchsaufbau konnten 12 Ansätze parallel untersucht werden. Hiervon waren jeweils 3 Ansätze für die Ermittlung der Restgasbildung im Inokulum und die Nullversuche (direkter Einbau des Substrates ohne Vorbehandlung) vorgesehen. Somit konnten pro Versuchsdurchgang die Gasbildung zweier Behandlungsvarianten erfasst werden.

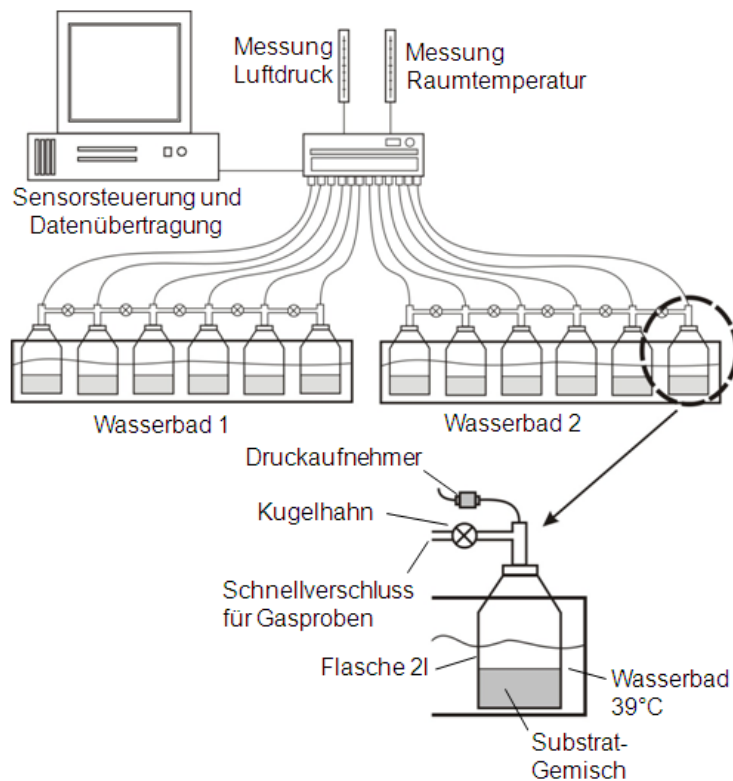


Abbildung 5.13: Schematischer Versuchsaufbau Gärversuche, labortechnische Versuche

5.4.4 Untersuchte Substrate

Die für die Versuche verwendeten Substrate bestanden aus einer definierten Mischung mehrerer pflanzlicher Substrate, um substratspezifische Schwankungen innerhalb einer Versuchsreihe weitestgehend zu reduzieren und definierte Eingangssubstrate nutzen zu können (Abbildung 5.14).

Die verwendeten Komponenten stehen über längere Zeiträume in annähernd gleicher Qualität zur Verfügung und beinhalten anaerob leicht bis mittelmäßig abbaubare Komponenten, die einen möglichen Effekt der Vorbehandlung unterliegen sollten (vgl. Kapitel 6.3.2). Die in den halbtechnischen Versuchen verwendete Maissilage hat aufgrund der vorhergegangenen Silierung den Nachteil, dass das Substrat hierdurch bereits einem stofflichen Aufschluss ausgesetzt war (vgl. Oechsner und Lemmer [2009]). Für die im halbtechnischen Ansatz benötigten Massen stand jedoch kein anderes geeignetes Substrat zur Verfügung (vgl. Kapitel 5.3.3).

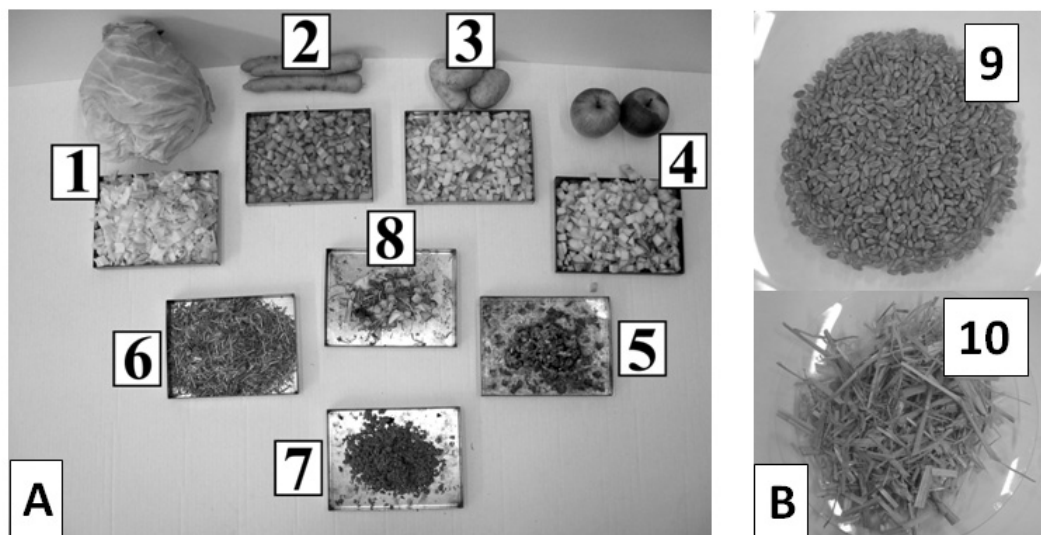


Abbildung 5.14: Aufbereitete Einzelkomponenten der Modellsubstrate (A: 1: Weißkohl, 2: Karotte, 3: Kartoffel, 4: Apfel, 5: Obsttrester, 6: Heu, 7: Biertreber, 8: Substratmischung; B: 9: Weizenkörner, 10: Weizenstroh)

Um lagerungsbedingte Effekte – beispielsweise durch Gefrierkühlung – möglichst gering zu halten wurden die Mischsubstrate jeweils frisch erstellt. Einzelne Substrate wie der Biertreber und der Obsttrester wurden in größeren Mengen bezogen und bis zur Weiterverarbeitung bei 3 - 4°C kühl gelagert.

Die verwendeten Substrate nebst Angaben zu deren Vergärbarkeit sind in der Tabelle 5.7 aufgeführt. Vor Beginn einer Versuchsreihe wurde das stückige Material

auf eine Kantenlänge von ca. 1 cm, Heu und Stroh auf eine Halmlänge von ca. 1 - 3 cm zugeschnitten und Biertreber sowie Obsttrester in der angelieferten Form weiterverarbeitet.

Die eingewogene Substratmasse der Versuchsansätze wurde anhand der jeweiligen oTS-Gehalte bemessen. Von jedem der Einzelsubstrate wurde eine oTS-Einwaage von zwei Gramm angestrebt, sodass insgesamt ca. 14 g oTS pro Ansatz aufgegeben wurden. Eine beispielhafte Substratmischung zeigt die Tabelle 5.8. Die tatsächlichen Substrateinwaagen sind ebenso wie die Einwaagen des Inokulums im Kapitel 6.3.2 aufgeführt. Das Inokulum aus der Nachgärstufe einer mesophilen zweistufigen Vergärungsanlage für Maissilage (angeimpft mit Rinder- und Schweinegülle) wurde im Technikum des Leichtweiß Instituts bis zur Entnahme gelagert und ausgefault.

Tabelle 5.7: Versuchssubstrate - labortechnische Versuche)

Substrat	Vergärbarkeit [Bekker, 2007; FNR, 2006; Viehmann, 2008]
Weißkohl	leicht
Karotte	leicht
Kartoffel	leicht
Apfel	leicht
Heu	mittelmäßig
Biertreber	mittelmäßig
Obsttrester	mittelmäßig
Weizenkörner	leicht
Weizenstroh	mittelmäßig - schwer

Tabelle 5.8: Beispielhafte Substratmischung - labortechnische Versuche

Substrate	TS-Gehalt [%]	oTS-Gehalt [%]	1 g oTS =x g Substrat	Einwaage Frisch- substanz [g]	Menge oTS in Versuchs- ansatz [g]
Weißkohl	9,85	89,1	11,4	22,8	2,0
Karotte	8,36	87,1	13,7	27,5	2,0
Kartoffel	15,04	94,8	7,0	14,0	2,0
Apfel	20,92	90,8	5,3	10,5	2,0
Heu	84,14	94,2	1,3	2,5	2,0
Biertreber	22,84	89,6	4,9	9,8	2,0
Obsttrester	11,14	95,1	9,4	18,9	2,0

5.4.5 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung ist schematisch in der Abbildung 5.15 dargestellt.

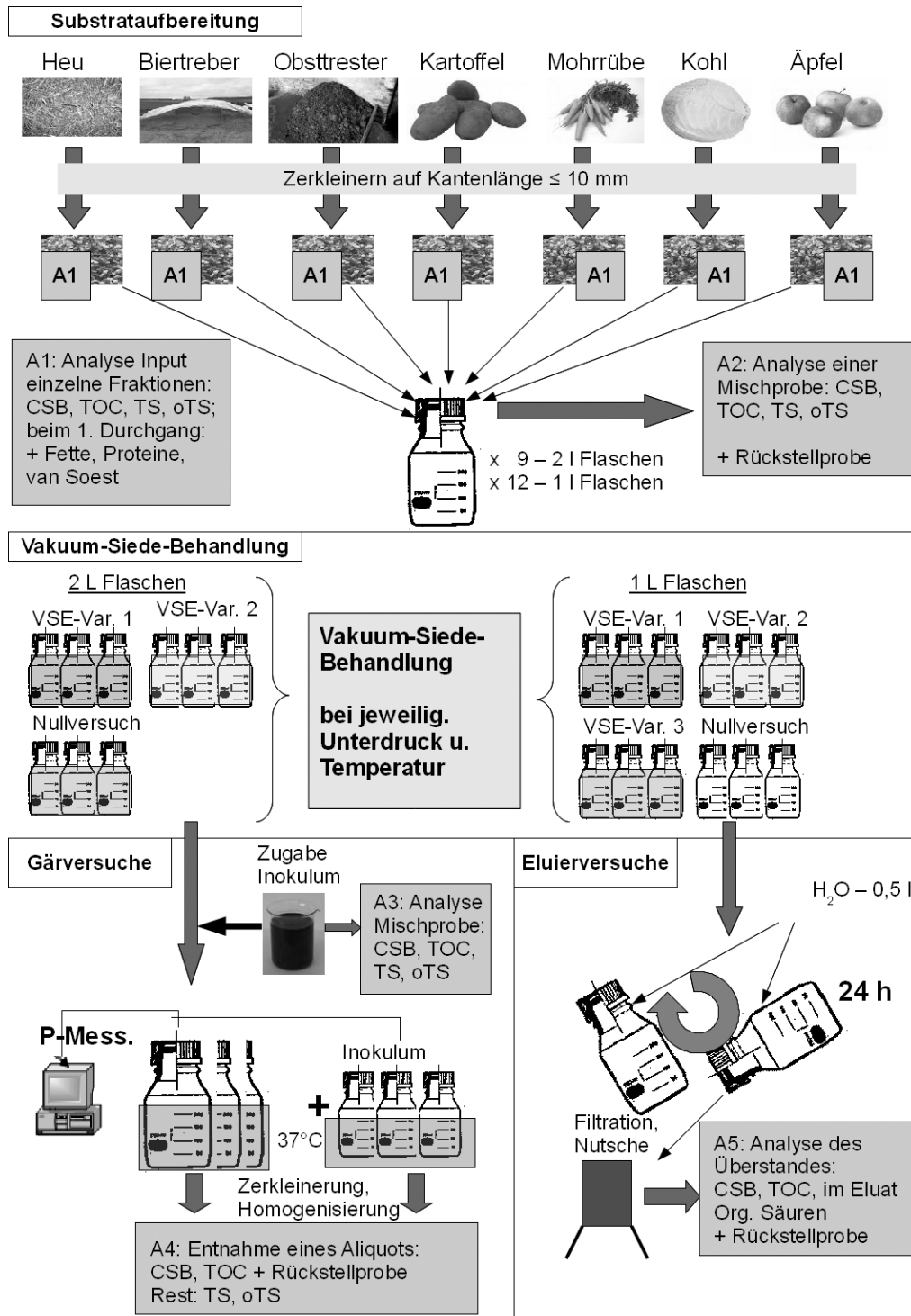


Abbildung 5.15: Versuchsdurchführung labortechnische Versuche

Das Versuchssubstrat wurde nach der Aufbereitung in Laborflaschen gefüllt (Gärversuche 2 l, Eluierversuche 1 l), gemäß den Versuchsbedingungen der jeweiligen Variante unter Unterdruck und/oder Wärme behandelt, anschließend für die Gärversuche mit dem Inokulum angeimpft und in die Gärtestapparatur eingebaut. Zudem wurde pro Versuchsreihe ein unbehandelter Ansatz als Nullversuch erstellt. Vor Verschluss der Gärgefäße erfolgte eine Spülung mit Stickstoff. Sämtliche Gäransätze wurden täglich manuell geschüttelt, um gebildete Schwimmschichten aufzulösen und eine regelmäßige Durchmischung sowie Entgasung zu gewährleisten.

Als Abbruchkriterium für die Versuche galt, dass die tägliche Biogasbildung nur noch 1 % des bis zu diesem Zeitpunkt angefallenen Biogasgesamtvolumens betrug [VDI 4630, 2006]. Aufgrund der nicht immer taggenauen Umrechnung der Druckwerte in volumetrische Angaben wurden die Versuche zum Teil zur Sicherheit länger betrieben. Für einen direkten Vergleich der Gasbildungsraten wurde später ein Bezug von 22 Tagen gewählt. Im Rahmen dieser Zeitspanne war das Abbruchkriterium bei allen Versuchen mit dem Mischsubstrat erreicht.

Zusätzlich zu den Gärversuchen erfolgte – unter den gleichen Bedingungen wie für die Gärversuche – eine Vorbehandlung in ein Liter Glasflaschen zur Durchführung von Eluierversuchen. Hierzu wurde das Substrat nach der Vakuum-Siede-Behandlung (bzw. Wärmebehandlung) mit 0,5 Litern Leitungswasser versetzt und 24 Stunden über Kopf geschüttelt, über einem Schwarzbandfilter abgenutscht und aus dem Filtrat Aliquote für weitere Analysen entnommen. Diese Abweichung zur TOC_{Eluat} -Analytik nach DIN war erforderlich, um mögliche Einflüsse eines erhöhten Drucks auf die Verfügbarkeit der Organik im Verlauf der Druckfiltration auszuschließen.

Alle Varianten wurden – soweit nicht anders vermerkt – im Dreifachansatz durchgeführt.

Die Messungen, Probennahmen und Analysen sind in der Tabelle 5.9 zusammengestellt.

Tabelle 5.9: Messungen, Probennahmen und Analysen, labortechnische Versuche

Untersuchtes Substrat	Analysen und Messungen
Substrat-Input vor Vakuum-Siedebehandlung	Masse, TS, oTS, CSB _{fest} , TOC, van Soest-Analyse, Gasbildung
Vakuum-Siede-Behandlung	Druck, Temperatur
Substrat nach Vakuum-Siedebehandlung	Masse, Gasbildung
Substrat im Gärversuch	Druckanstieg zur Bestimmung der Gasbildung, Füllstand Gärsubstrat
Substratoutput nach Gärversuch	Masse, TS, oTS, CSB, TOC
Substratoutput nach Eluierversuch (Fluid)	Masse, TS, oTS, CSB, TOC,

5.4.6 Probennahme, -aufbereitung und -lagerung

Die Probenaufbereitung für die CSB-Feststoffanalytik der unbehandelten Substrate erfolgt mit einer Kugelmühle, um eine möglichst homogene Probe zu erzeugen. Den trockenen Einzelsubstrat (Heu, Stroh, Weizenkörner) musste hierzu eine definierte Menge Wasser zugegeben werden, um eine möglichst hohe Zerkleinerungswirkung zu erzielen.

Nach den Gärversuchen wurde das Substrat in einem handelsüblichen Standmixer für die folgenden Analysen zerkleinert, homogenisiert und aus dieser Suspension die Aliquote für weitere Analysen entnommen.

5.4.7 Versuchsvarianten

Für die Versuchsvarianten wurden bis auf wenige Ausnahmen Prozessbedingungen gewählt, die eine hohe Behandlungsintensität im Sinne des Verfahrensansatzes (vgl. Kapitel 4.4.6) abbilden, da sich bereits in den vorhergegangenen Versuchsreihen abzeichnete, dass – wenn überhaupt – nur geringe Aufschlusseffekte durch eine Vakuum-Siede-Behandlung erreichbar sein würden (Tabelle 5.10).

Die Versuchsreihen V.1 und V.2 entsprechen der in der Abbildung 5.15 dargestellten Versuchsdurchführung.

Tabelle 5.10: Versuchsvarianten, labortechnische Versuche, MS = Mischsubstrat, St = Stroh, Temperatur der Nullversuche: Raumtemperatur - ca. 15°C

Versuchsreihe	Versuchsvariante	Druck [mbar]	Temperatur [°C]	zusätzliche Bedingungen	Anmerkung
V.1	MS5085-V1	50	85		
	MS0085-V1	-	85		
	MS0015-V1	-	15		Nullversuch
	MS-I-V1	-	-		Inokulum
V.2	MS5030-V2	50	30		
	MS0030-V2	-	30		
	MS0015-V2	-	15		Nullversuch
	MS-I-V2	-	-		Inokulum
V.3	MS5085-V3	50	85	mech.Energ.	
	MS0085-V3	-	85	mech.Energ.	
	MS0015-V3	-	15	mech.Energ.	Nullversuch
	MS-I-V3	-	-		Inokulum
V.4	MS5085-V4	50	85	+ ca. 250 g H ₂ O	
	MS5040-V4	50	40	+ ca. 250 g H ₂ O	
	MS0015-V4	-	15	+ ca. 250 g H ₂ O	Nullversuch
	MS-I-V4	-	-		Inokulum
V.5	St5040-V5	50	40	+ ca. 170 g H ₂ O	
	St5085-V5	50	85	+ ca. 170 g H ₂ O	
	St0015-V5	-	15	+ ca. 170 g H ₂ O	Nullversuch
	St-I-V5	-	-		Inokulum
V.6	MS5085-V6	50	85	+ ca. 160 g H ₂ O	
	MS0085-V6	-	85	+ ca. 160 g H ₂ O	
	MS0015-V6	-	15	+ ca. 160 g H ₂ O	Nullversuch
	MS-I-V6	-	-		Inokulum

In Versuchsreihe V.3 wurde zusätzlich im Verlauf der Vakuum-Siede-Behandlung eine leichte bis mäßige mechanische Beanspruchung auf das Substrat ausgeübt. Die Einbringung der mechanischen Energie sollte lediglich einen möglichen desintegrierenden Einfluss der Unterdruckbehandlung unterstützen. Hierzu wurde ein handelsüblicher Druckkochtopf so umgerüstet, dass im Inneren der Druck auf 50 mbar verringert werden konnte. Zur Einbringung mechanischer Energie wurden sechs Sinterkorund-Kugeln aus einer Kugelmühle hinzugefügt und der Topf 15 Minuten auf eine Analysesiebmaschine (Haver UWL 400, Drehzahl 1500 U/min) gespannt. Vorversuch

che zeigten eine mäßige Beanspruchung des Mahlgutes. Das Substrat wies auch nach Ende des Mahlvorganges noch seine deutlich erkennbare Stückigkeit auf und wurde nicht zu einer einheitlich pastösen Masse zermahlen.

Die Versuchsreihen V.4 - V.6 wurden grundsätzlich nach dem in der Abbildung 5.15 dargestellten Verfahrensablauf durchgeführt. Um eine mögliche positive Beeinflussung einer Behandlung in wässriger Phase unter Siedebedingungen zu untersuchen, wurde den Substratproben vor der Vakuum-Siedebehandlung die in der Tabelle 5.10 angegebenen Wassermassen zugegeben. Die Dosierung stellte sicher, dass eine gleichmäßige Durchfeuchtung des Substrates eintrat, ohne eine Suspension zu erzeugen.

Aufgrund erheblicher Probleme im Verlauf der Gärversuche in Versuchsreihe V.4 wurde zusätzlich nach Auswertung der Versuchsdaten die Versuchsreihe V.6 durchgeführt. Für diese letzte Versuchsreihe stand kein Obsttrester zur Verfügung bzw. war aufgrund der Jahreszeit nicht ohne erheblichen Mehraufwand zu beziehen. In der Versuchsreihe V.5, fand eine Mischung aus leicht abbaubaren Weizenkörnern und mittelmäßig bis schwer abbaubarem Weizenstroh Verwendung.

5.5 Mess- und Analysemethoden

5.5.1 Probenlagerung

Proben sollen nach Möglichkeit kühl bei Temperaturen um 4°C transportiert und gelagert werden und möglichst unverzüglich für die Versuche eingesetzt werden. Laut VDI 4630 [2006] sollen Proben, die nicht zeitnah verarbeitet werden können bei einer Temperatur von -25°C tiefgefroren gelagert oder gefriergetrocknet werden. Ein wesentlicher Nachteil dieser Lagerung im Hinblick auf die bearbeitete Fragestellung ist, dass insbesondere pflanzliche Materialien durch einen Gefriervorgang aufgeschlossen werden können. Dies kann zu einer signifikanten Beeinflussung der Gärergebnisse führen und es kann zusätzlich zu Verlusten flüchtiger Bestandteile kommen. Auf tiefgekühlte Lagerung wurde daher nach Möglichkeit verzichtet. Die Proben wurden stattdessen bei ca. 4 °C kühl gelagert und möglichst zeitnah verarbeitet.

5.5.2 Standardanalysen und -parameter

Alle in der Tabelle 5.11 genannten Analysen wurden im Labor des Leichtweiß-Instituts der Technischen Universität Braunschweig nach den genannten Untersuchungsmethoden vorgenommen. Die in Kapitel 5.5.3 beschriebene Bestimmung der unlöslichen organischen Ballaststoffe (van Soest-Analyse) wurden an der Universität

Kassel, Abteilung Tierernährung und Tiergesundheit, durchgeführt.

Tabelle 5.11: Verwendete Analysemethoden für Feststoffe und Flüssigkeiten

Parameter	Kurz- bezeichnung	Untersuchungsmethode
Chemischer Sauerstoffbedarf	CSB _{flssig} CSB _{Feststoff}	[DIN 38409 Teil 41, 1980] 0,015g statt 20 ml
Gasbildungspotenzial	GB ₂₁ GB ₁₀	Anhang 4 der Abfallablagerungs- verordnung vom 01.03.2001, Ab- weichungen gesondert angegeben Verkürzung des GB ₂₁ auf 10 Tage Abweichungen gesondert angegeben, eigene Versuchsaapparaturen
Glühverlust	GV	[DIN 38409 Teil 1, 1987]
organischer Trockenrückstand	oTS	hier: gleichbedeutend mit GV
pH-Wert	pH	[DIN 38404-5, 2009]
Total Organic Carbon im Eluat	TOC _{Eluat}	Eluatherstellung: [DIN 38414 Teil 4, 1984] [DIN EN 1484, 1997]
Total Organic Carbon im Feststoff	TOC _{Feststoff}	[DIN EN 13137, 2001]
Trockenrückstand	TS	[DIN 38409 Teil 1, 1987]

5.5.3 Ergänzende Angaben zu Standardanalysen, zusätzliche Analysen und Parameter

CSB-Feststoff

Der chemische Sauerstoffbedarf von Feststoffen wurde verändert nach DIN 38 409 Teil 1 bestimmt. Anstatt 20 ml Probenvolumen wurde eine Probenmasse von 0,015 g verwendet. Dieses Verfahren wird seit Jahren in der Abteilung Abfall- und Ressourcenwirtschaft angewandt und hat sich bewährt.

Gasbildungsrate

Die Gasbildung in 21 Tagen (GB₂₁) bzw. nach 10 Tagen (GB₁₀) wurden – soweit nicht anders angegeben – mit einem Gärtest, angelehnt an die in der Tabelle 5.11 genannte Vorschrift der Abfallablagerungsverordnung (AbfAbIV, DeponieV) durchgeführt.

Modifikationen waren nötig, da der Versuchsaufbau nach AbfAbIV für stabilisierte Abfälle mit relativ geringen Gaserträgen konzipiert ist. Erste Versuche mit der geforderten Probeneinwaage von 50 g führten zu Gaserträgen, die eine nicht immer zu gewährleistende Ablesung in sehr kurzen Intervallen erforderlich gemacht hätte. Durch das Überangebot an organischer Substanz kam es außerdem zu starker Versäuerung bis pH 2.

Um die Abbaueigenschaften der erzeugten Pressate zu beurteilen, wurde die Einwaage deutlich verringert und oTS-Belastungen von ca. 3 g oTS/l in den Reaktoren (Glasflaschen 0,5 l, Fa. Schott) eingestellt. Den Flaschen wurde 50 ml ausgefaulte Faulschlamm einer kommunalen Kläranlage als Inokulum sowie 250 ml destilliertes Wasser zugesetzt. Aufgrund der allgemein guten Abbaubarkeit der Substrate, konnte die Versuchsdauer von 21 auf 10 Tage reduziert werden. Diese verkürzte Dauer der Gärversuche für die halbertechnischen Versuche war auch aufgrund der zeitlich nur begrenzten Nutzungsmöglichkeit der Schneckenpresse und der begrenzten Anzahl der Versuchsapparaturen für die Gasversuche notwendig.

Während der Versuchsdurchführung wurden die Reaktoren zur Vermeidung von Schwimmschichten alle zwei Tage manuell geschüttelt / homogenisiert.

Für die Analysen der Gasbildungsraten in den labortechnischen Untersuchungen wurde als Inokulum ausgefaultes Gärsubstrat aus landwirtschaftlichen Vergärungsanlagen eingesetzt, da dieses eine höhere Pufferkapazität und eine bessere Adaption an das Versuchssubstrat aufwies. Die übrigen Methoden zur Bestimmung der Gasbildungsraten sind den Beschreibungen der Versuchsaufbauten zu entnehmen.

Van Soest Analytik

Die Stoffgruppenanalyse nach van Soest dient der Bestimmung der Faserstoffe in Pflanzen (Cellulose, Hemicellulose und Lignin). Es werden hierbei folgende Stoffgruppen unterschieden:

- ADS_{org} (Acid Detergent. organische Substanz): leicht abbaubare organische Substanz ,
- ADF (Acid Detergent Fiber): Cellulose, Lignin und Lignin-N-Verbindungen ,
- NDF (Neutral Detergent Fiber): Hemicellulose, Cellulose, Lignin und Lignin-N-Verbindungen ,
- ADL (Acid-Detergent-Lignin): Rohlignin ,
- NDF minus ADF: Hemicellulose,

- ADF minus ADL: Cellulose.

Zusätzlich zu den Van Soest-Parametern wurden die Gehalte an Rohprotein (XP) und Rohfett (XL) bestimmt.

FOS/TAC

Die FOS/TAC-Analytik ist ein von der Bundesanstalt für Landwirtschaft (FAL) adaptierter Titrationstest (Nordmann-Methode) zur Bestimmung des Quotienten aus Säurekonzentration und Pufferkapazität im Gärsubstrat. Jeweils 20 ml von groben Verunreinigungen befreite Probe werden während der Titration mittels eines Magnetrührers homogenisiert. Die Titration erfolgte mit 0,1 N H₂SO₄ bis pH 5 und anschließend bis pH 4,4. Die Bestimmung der beiden Werte des FOS/TAC erfolgt nach folgendem Verfahren

- TAC = H₂SO₄-Verbrauch bis pH 5 in [ml]*250
- FOS = (H₂SO₄-Verbrauch von pH 5 bis pH 4,4 in [ml]*1,66 - 0,15)*500

Bestimmung der Gaszusammensetzung

Die Zusammensetzung des Biogases wurde mit einem Gaschromatographen (GC) der Firma Shimadzu Deutschland GmbH, Modell GC-8A analysiert. Der Gaschromatograph analysiert den Gehalt von Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Sauerstoff (O₂) und Stickstoff (N₂).

5.5.4 Berechnungsmethoden

Normierung der Gaserträge und Berechnung der spezifischen Gasausbeute

Die Umrechnung der ermittelten Volumina auf Standardbedingungen erfolgte nach der Gleichung 5.1.

$$V_0 = V_G * \frac{(p_L - p_W) * T_0}{p_0 * T} \quad (5.1)$$

V_0	[l]	Normgasvolumen
V_G	[l]	gemessenes Gasvolumen
p_L	[mbar]	gemessener Gasdruck
p_W	[mbar]	Dampfdruck des Wassers
p_0	[mbar]	Normdruck (1013,25)

T_0	[K]	Normtemperatur (273,15)
T	[K]	Temperatur im Gasraum

Die spezifischen Gasausbeuten, bezogen auf die eingewogene oTS-Masse des Gasbildungsversuchs unter Berücksichtigung der Gasbildung des eingesetzten Inokulums ergeben sich aus der Gleichung 5.2.

$$V_S = \frac{\sum_{i=1}^n V_{Ni} - V_I}{m * oTS} \quad (5.2)$$

V_S	[l/kg oTS]	spez. Gasbildung, bezogen auf oTS des Gärsubstrates
V_{Ni}	[l]	Gasvolumen der einzelnen Ablesungen
V_I	[l]	Eigengasbildung des Inokulums aus Nullversuchen
m	[kg]	Substrateinwaage im Versuchsreaktor
oTS	[Massen-%]	oTS-Gehalt des Substrates

Berechnung des Abbaugrades anhand des oTS-, TOC- und CSB-Abbaus

Der Abbaugrad im Verlauf der Gärversuche wurde bezogen auf den oTS, den TOC und den CSB errechnet. Die Gleichung 5.3 zeigt die Berechnung anhand des oTS. Die Berechnungen über den TOC und CSB erfolgten analog. Die Summenparameter wurden separat für das Versuchssubstrat und das Inokulum ermittelt. Nach Versuchsende musste aufgrund der zwangsläufigen Vermischung der Substrate während des Gärversuches eine Bestimmung des jeweiligen Wertes aus dem Mischsubstrat erfolgen. Unter der Annahme, dass der jeweilige Abbau im Inokulum aufgrund des bereits weitgehenden Abbaus vernachlässigbar ist, wurde der Abbau des jeweiligen Summenparameters auf den Input des Versuchssubstrates bezogen.

$$\eta_{oTS} = \frac{oTS_{in,Substrat} + oTS_{in,Inokulum} - oTS_{out}}{oTS_{in,Substrat}} \quad (5.3)$$

η_{oTS}	[%]	Abbaugrad bezogen auf den oTS
$oTS_{in,Substrat}$	[g]	oTS des Substrates zu Versuchsbeginn
$oTS_{in,Inokulum}$	[g]	oTS des Inokulums zu Versuchsbeginn
oTS_{out}	[g]	oTS nach Versuchsabschluss

Umrechnung der Druckwerte aus Gärversuchen der labortechnischen Versuche

Zur Umrechnung des gemessenen Gasdrucks in den Gärbehältern in ein normiertes Gasvolumen wurde eine Umrechnung der Messwerte nach dem idealen Gasgesetz (Gleichung 5.4) unter Beachtung des Gesetzes von Gay-Lussac und des Boyle-Mariottschen Gesetzes vorgenommen.

$$p(T, V) = \frac{nRT}{V} \quad (5.4)$$

p	[Pa]	Druck
T	[K]	Temperatur
V	[m ³]	Volumen
n	[-]	Teilchenzahl
R	[J/(mol · K)]	allgemeine Gaskonstante

Das Volumen wurde über den Versuchsverlauf als Funktion des Füllstandes in den Versuchsreaktoren erfasst und nachträglich über Auslitern mit Wasser ermittelt. Die Temperatur in der Gasphase wurde anhand identischer Vorversuche mittels eines im Gasraum verschraubten Thermometers ermittelt. Da die Versuchsbedingungen – insbesondere die Temperatur des Wasserbades – konstant gehalten wurden, ist allenfalls von minimalen Abweichungen auszugehen.

Umrechnung in Frachten

Die Frachten wurden je nach Versuchsaufbau auf eine Grundeinheit im Substrat-Input normiert. In den großtechnischen und halbtechnischen Versuchen erfolgte die Normierung im Wesentlichen auf die Einheit Mg Substrat-Input (TS). Für die labortechnischen Versuche wurde aufgrund der dort gehandhabten geringer dimensionierten Massen die Einheit mg/g Substrat-Input oTS gewählt.

Insbesondere im Verlauf der halbtechnischen Versuche kam es durch die Bau- und Betriebsweise der Versuchsaggregate zu Massenverlusten im Vakuum-Siede-Reaktor und Anmischbehälter. Diese wurden durch Wägungen vor und nach jedem Verfahrensschritt erfasst. Die Berücksichtigung der Substratverluste erfolgte durch den Bezug der Frachten auf den Input des Pressaggregats. Die CSB-Fracht wurde nach der Gleichung 5.5 berechnet; die Frachten an TS, oTS lassen sich analog berechnen. Die Fracht der Gasbildung wurden aus der Gasbildung der Pressate und der oTS-Fracht nach der Gleichung 5.6 ermittelt.

$$CSB_{Fracht} = CSB_P * \frac{m_{Pressat}}{(m_{in} - m_{Verlust}) * TS} \quad (5.5)$$

CSB_{Fracht}	[kg O_2 *Mg TS^{-1}]	CSB Fracht
CSB_P	[g O_2 *kg $^{-1}$]	CSB-Gehalt im Pressat
$m_{Pressat}$	[kg]	Pressatmasse
m_{in}	[kg]	Masse Substrat-Input
$m_{Verlust}$	[kg]	Masse des Substratverlustes
TS	[-]	TS Gehalt des Substrates vor Fest-Flüssig-Trennung

$$GB_{Fracht} = oTS_{Konz.} * GB_{Pressat} \quad (5.6)$$

GB_{Fracht}	[Nm 3 *Mg TS^{-1}]	Gasbildungs-Fracht
$oTS_{Konz.}$	[kg oTS * Mg TS^{-1}]	TS-Konzentration
$GB_{Pressat}$	[Nm 3 * kg oTS^{-1}]	Gasbildung des Pressats

Varianzanalyse

Als Verfahren der Varianzanalyse wurde die einfaktorielle ANOVA (analysis of variance) gewählt. Die zu testenden Hypothesen waren hierbei die Nullhypothese (H_0) und die Alternativhypothese (H_1).

Die Nullhypothese besagt, dass zwischen den Mittelwerten der Gruppen (die den Faktorausprägungen bzw. Faktorstufen entsprechen) kein Unterschied besteht. Die Alternativhypothese trafe zu, wenn die Nullhypothese im gewählten Konfidenzniveau (oder Signifikanzniveau) von 5 % zu verwerfen wäre.

Dies würde bedeuten, dass aufgrund der unterschiedlichen Vorbehandlungsintensitäten ein signifikanter Unterschied der analysierten Parameter besteht. Es wurde davon ausgegangen, dass die Messwerte normalverteilt sind.

Der Wert der F-Verteilung (Fischer-Verteilung) errechnet sich nach der Gleichung 5.7. Der Wert der F-Verteilung für gegebene Freiheitsgrade (F-Quantil) kann in einer Fisher-Tafel nachgeschlagen werden [Lorenz, 1996]. Die Freiheitsgrade der Zufallsvariable $F_{k-1, n-k}$ werden als Indizes angegeben, wobei k die Anzahl der Varianten (Faktorstufen) und n die Anzahl der Messwerte sind. In den vorliegenden Fällen ist $k=2$ und $n=6$, da die Versuche stets in dreifacher Wiederholung durchgeführt wurden ($n = 2 \cdot 3$) und jeweils zwei Varianten miteinander verglichen werden ($k=2$). Für das gewählte Signifikanzniveau (5 %) ist $F_{1,4} \approx 7,71$ das F-Quantil. Das heißt, dass

bei allen Werten der Testgröße F bis 7,71 die Nullhypothese nicht abgelehnt werden kann.

$$F = \frac{n_1 n_2 (\bar{x}_1 - \bar{x}_2)^2}{n_1 var_1 + n_2 var_2} \quad (5.7)$$

n	Anzahl der Messwerte
\bar{x}	Mittelwert der jeweiligen Messwerte
var	Varianz der jeweiligen Messwerte

Kapitel 6

Versuchsergebnisse

6.1 Großtechnische Versuche

6.1.1 Allgemeine Angaben

Mit den großtechnischen Versuche sollten folgende Bereiche untersucht werden:

- Technische Funktionsfähigkeit der Anlage für die Vakuum-Siede-Extraktion,
- Extraktionsleistung auf Basis der CSB-Extraktion (im Vergleich zur Perkolation),
- Energiebedarf und Energieeffizienz (Energiebedarf gegen potenziellen Energiegewinn über Biogasgewinnung),
- Abluftvolumen,
- Kondensatqualität.

6.1.2 Technische Funktionsfähigkeit

Die verwendete Versuchsanlage – ursprünglich eher für Versuche zur Vakuumtrocknung vorgesehen – ist grundsätzlich für das Verfahren der Vakuum-Siede-Extraktion einsetzbar. Für einen Prototypen nicht unerwartet, kam es während des Versuchsbetriebes mehrfach zu Störungen der Anlagentechnik. Einige der Probleme und Fehler konnten im Verlauf des Versuchsbetriebes ganz oder teilweise behoben werden. Für die Konzeptionierung der weiterführenden Untersuchungen lieferten die Funktionstests wertvolle Erkenntnisse (Tabelle 6.1).

Tabelle 6.1: Probleme, Störungen und Lösungsansätze großtechnische Versuchsanlage

Störung, Probleme, Schwäche	Gegenmaßnahme(n)	umgesetzt	erforderlich
Verstopfung und Festfahren der Förderspiralen im Reaktor	Reversierschaltungen der Getriebe	X	
mangelhafter Überwurf und damit ungenügende Durchmischung des Substrates	Nachträglich installierte Überwurfschaufeln an Förderspiralen	X	
sehr lange Befüllzeiten z.T. > 1 h für 500 kg und Brückenbildung im Aufgabetrichter	Erhöhung der Fördergeschwindigkeit Spiralförderer Befüllung Grundsätzliche Optimierung des Befüllprozesses (Anlage im Gesamtsystem)	X	X
Verwendete Wasserringvakuumpumpe nicht auf optimaler energetischer Kennlinie	Austausch der Vakuumpumpe und Anpassung an Betriebsbedingungen		X
Undichtigkeiten am Austragsschieber (Kunststoffdichtung) dadurch erhöhte Aufwendungen für Vakuumbetrieb	Veränderung der Austragsöffnung Erhöhung Dauerhaftigkeit u. Abrasionsfestigkeit		X
Korrosion und Abrasion in Reaktorröhre (insbesondere Kontaktflächen Spiralförderer)	Verwendung höherwertigen Stahls, ggf. Opferstahlschienen für Spiralförderer		X
sehr lange Zeiten zur Entleerung des Reaktors	Wahlweise erhöhte Schneckengeschwindigkeit für Entleerungsvorgang		X
unzureichende Entwässerungsleistung oder Verstopfungen der Presse I	Substratspezifische Einstellungen des Pressweges, Presszapfens/Gegendrucks		X
hohe Frachten an Fasern und mineralischer Trockenmasse im Pressat (Presse I und II)	Anpassung des Spaltmaßes und des Pressdrucks		X

6.1.3 Extraktionsleistung

Im Rahmen der großtechnischen Versuche wurde der CSB als Parameter für die Extraktionsleistung herangezogen. Aufgrund bereits vorliegender Ergebnisse aus Untersuchungen der Perkolation als Vorbehandlungsverfahren von Abfällen vor der Vergärung von Santen [2007], die auf dem selben Anlagenstandort mit den dort angelieferten kommunalen Haushaltsabfällen durchgeführt wurden, lagen Vergleichswerte für spezifische CSB-Extraktionsleistungen vor. Anhand dieser Werte und der ermittelten spezifischen energetischen Aufwendungen kann die Vakuum-Siede-Extraktion in ihrer Leistungsfähigkeit eingeordnet werden.

Wie aus der Tabelle 5.2 im Kapitel 5.2.6 ersichtlich, konnten in den orientierenden Versuchen an der großtechnischen Anlage nur einige der wesentlichen Prozessparameter untersucht werden:

- Durchmischungszeit und Temperaturen in der Maische,
- Prozesswasserzugabe,
- unterschiedliche Durchmischungszeiten und
- die Art und Häufigkeit der Entwässerung.

Aufgrund bestehender Vorkenntnisse aus den Untersuchungen zur Perkolation (vgl. Santen [2007]) konnte davon ausgegangen werden, dass diese Parameter – neben einem möglichen Einfluss der Vakuum-Siede-Behandlung – einen entscheidenden Einfluss auf die gesamte Extraktionsleistung ausüben.

In der Abbildung 6.1 und der Tabelle 6.2 sind die erzielten CSB-Konzentrationen und CSB-Frachten aufgeführt, differenziert nach den verschiedenen Versuchsvarianten. Die Pressate der ersten beiden dargestellten Varianten stammen aus zwei aufeinanderfolgenden Chargen, die aufgrund der Probenahmesituation nacheinander beprobt werden mussten. Bei den Varianten HM5080-3 und HM10080 wurden Mischproben der einzelnen Extraktionsdurchgänge verwendet. Die Variante HM5080-1 konnte aufgrund eines Pressenausfalls nicht hinreichend repräsentativ beprobt werden.

Aus dem zuvor unbehandelten Hausmüll konnte eine CSB-Extraktion von bis zu 180,3 kg CSB pro Mg TS bzw. 92,1 kg CSB pro Mg FS Reaktor-Input (ca. 80 % der im Input-Material ermittelten CSB-Fracht) erzielt werden. Das Verhältnis von gelöstem CSB zum Gesamt-CSB im Pressat beträgt ca. 0,75 – der CSB lag somit weitgehend in gelöster und damit leicht verfügbarer Form vor. Die Massenbilanzen der Versuche sind im Anhang A enthalten.

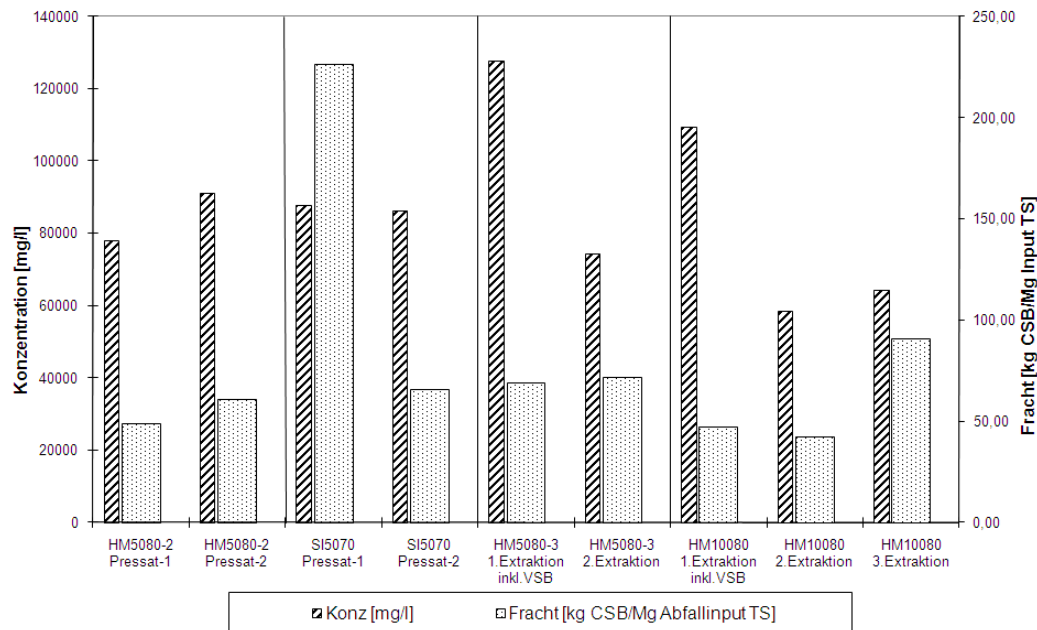


Abbildung 6.1: CSB-Konzentrationen und -Frachten der großtechnischen Versuche

6.1.4 Potenzieller Energiegewinn und Energiebedarf

Der CSB kann indirekt auch zur Bestimmung der zu erwartenden Biogasproduktion herangezogen werden. Nach ATV [1993] liefert ein kg abgebauter CSB mit einer mittleren Gasproduktion von 350 Nl Methan. Gemäß VDI 4630 [2006] beträgt der potenzielle Methanertrag 320 Nl pro kg. Im vorliegenden Fall wurde mit letzterer Angabe gerechnet.

Ausgehend von einer hohen Abbaubarkeit des Pressats sowie einer Abbauleistung im Fermenter von 90 %, könnte ein Biogasertrag von ca. 76,4 Nm³/Mg TS bzw. 39,0 Nm³/Mg FS Reaktor-Input (80 % des Gesamtabfalls) FS erzielt werden. Unter der Voraussetzung, dass der CH₄-Anteil im Biogas ca. 68 % beträgt, sind CH₄-Erträge von bis zu 51,9 Nm³/Mg TS bzw. 26,5 Nm³/Mg FS Hausmüll Reaktor-Input zu erreichen. Für den Versuch mit Maissilage sind unter gleichen Annahmen 35,8 Nm³ Biogas/Mg FS zu veranschlagen.

Bei einem Energiegehalt von 9,94 kWh/Nm³ CH₄ sind, unter Annahme eines Wirkungsgrads für ein BHKW von 30 % elektrischer und 55 % thermischer Energie, somit Energiegewinne von 79,1 kWh_{elektr.} und 145,1 kWh_{therm.} pro Mg FS Reaktor-Input Hausmüll mit der ermittelten Biogasfracht erreichbar (72,6 kWh_{elektr.} und 133,2 kWh_{therm.} pro Mg FS Maissilage).

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in der Tabelle 6.2 zusammengefasst. Es ist

jedoch zu berücksichtigen, dass es sich bei diesen Angaben eher um maximal erreichbare Werte handelt. Edelmann [2001] gibt für die Vergärung verschiedene Substrate in Praxisfermentern nach dem USAB-Prinzip spezifische Methanproduktionen von 190 - 330 $\text{Nm}^3/\text{kg CSB an}$.

Tabelle 6.2: CSB-Konzentrationen und Frachten sowie zu erwartender Biogas-, Methan- und Energiegewinn

	HM5080-2	SI5070	HM5080-3	HM-10080
CSB-Konz. $[\text{mg/l}]$	84.640,0	87.436,4	93.426,1	70.223,7
CSB Fracht $[\text{kg/Mg FS}]$	59,5	84,1	77,1	92,1
Biogas $[\text{Nm}^3/\text{Mg FS}]$	25,2	35,8	32,6	39,0
CH_4 $[\text{Nm}^3/\text{Mg FS}]$	17,1	24,4	22,2	26,5
Energieertrag elektr. $[\text{kWh/Mg FS}]$	51,1	72,6	66,2	79,1
Energieertrag Wärme $[\text{kWh/Mg FS}]$	93,6	133,2	121,3	145,1
CSB Fracht $[\text{kg/Mg TS}]$	109,7	291,7	141,1	180,3
Biogas $[\text{Nm}^3/\text{Mg TS}]$	46,4	129,4	59,8	76,4
CH_4 $[\text{Nm}^3/\text{Mg TS}]$	31,6	88,0	40,6	51,9
Energieertrag elektr. $[\text{kWh/Mg TS}]$	94,2	262,3	121,2	154,9
Energieertrag Wärme $[\text{kWh/Mg TS}]$	172,7	480,9	222,2	283,9

Bei Erstellung der Energiebilanzen waren anlagebedingt zwei Energieverbräuche zu erfassen:

- $\text{Energie}_{\text{therm.}}$ (Heizenergie) $[\text{kWh}]$,
- $\text{Energie}_{\text{elektr.}}$ $[\text{kWh}]$.

Die thermische Energie wurde über den Vor- und Rücklauf der Mantelheizung (Ölheizung) nebst den Massenflüssen des Heizwassers berechnet. Zur Plausibilitätskontrolle sind ergänzend für einzelne Versuche die Heizölverbräuche gemessen worden. Für die Wärmeberechnung wurde für einen Liter Heizöl (leicht) der untere Heizwert (H_u) mit $9,6 \text{ kWh/l}$ festgelegt. Unter Berücksichtigung des Kesselwirkungsgrades und der nicht vollkommen isolierten Heizwasserleitungen wurde für die Energieaufwandsberechnung $8,0 \text{ kWh/l}$ zu Grunde gelegt. Beide Berechnungsverfahren liefern annähernd gleiche Werte für die aufgewendete Heizenergie.

Die elektrischen Energieaufwendungen wurden als Summe über alle elektrischen Anlagenteile erfasst. Die Energiewerte wurden nachträglich um die Energieaufwendungen reduziert, die in einem quasikontinuierlichen Anlagenbetrieb sowie ohne Stö-

rungen und Unterbrechungen für Messungen und Probenahmen entfallen würden. Dies betrifft Vorlaufzeiten sowie störungs- und versuchsbedingte Leerlaufzeiten.

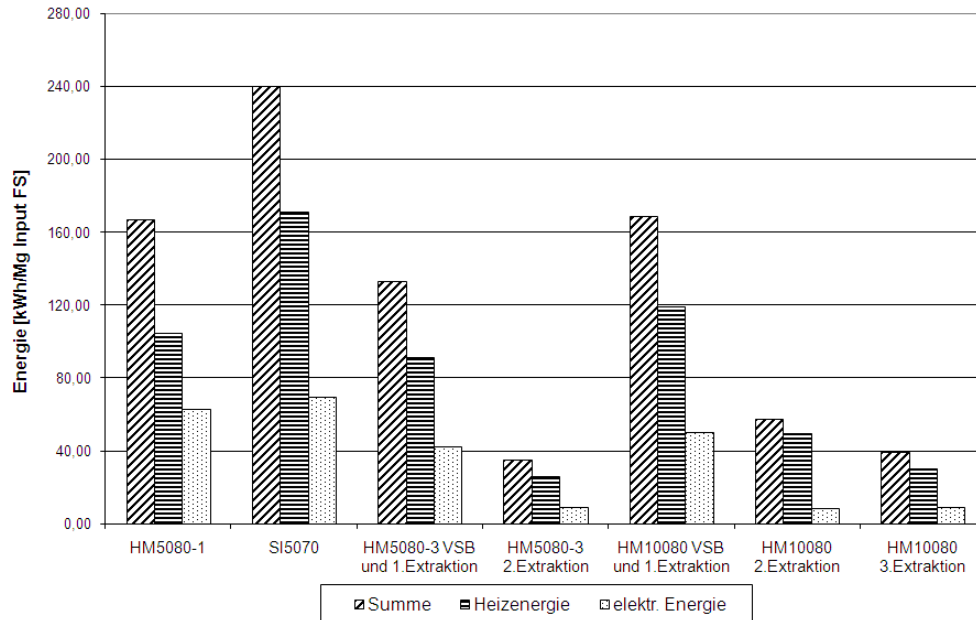


Abbildung 6.2: Energieverbrauch der großtechnischen Versuche ohne Vorlauf- und Leerlaufzeiten

Tabelle 6.3: Energieverbrauch der großtechnischen Versuche ohne Vorlauf- und Leerlaufzeiten [kWh/Mg Input-FS]

	Summe [kWh]	Heizenergie [kWh]	elektr. Energie [kWh]
HM5080-1	166,90	104,59	62,31
SI5070	240,02	170,87	69,15
HM5080-3 VSB und 1.Extraktion	132,75	90,87	41,88
HM5080-3 2. Extraktion	34,75	25,9	8,9
HM10080 VSB und 1.Extraktion	168,72	118,75	49,97
HM10080 2. Extraktion	57,31	49,01	8,30
HM10080 3. Extraktion	38,96	30,18	8,78

Die Ergebnisse sind in der Abbildung 6.2 dargestellt und in der Tabelle 6.3 zusammengefasst. Die Energieverbräuche der Variante HM5080-2 konnten aufgrund von Ausfällen in der Messwertaufzeichnung nicht vollständig erfasst werden und sind daher nicht enthalten.

Aufgrund der nicht auf die Pilotanlage abgestimmten elektrischen Aggregate sind die in der Versuchsphase ermittelten Energieverbräuche_{elektrisch} deutlich überhöht. Dies gilt insbesondere für die eingesetzte Vakuumpumpe, die für die bestehende Anlage überdimensioniert war und auf einer für das Aggregat nicht optimalen Kennlinie arbeitete. Dies führte zu einer Beeinträchtigung des energetischen Wirkungsgrades.

Für die Energiebilanz bzw. die Neuauslegung einer möglichen großtechnischen Anlage zur Vakuum-Siede-Behandlung (mit Extraktion und Trocknung) sind Leistungsdaten in modifizierter Form verwendet worden. Diese Modifikation erfolgte aufgrund der in den großtechnischen Vorversuchen erhobenen Daten, praktischer Erfahrungen mit der Versuchsanlage und in Abstimmung mit der Herstellerfirma sowie dem zuliefernden Maschinenbaubetrieb. Es wurden folgende Annahmen getroffen:

- Energien für das Aufheizen der Anlage werden nicht berücksichtigt, da diese Aufwendungen im Dauerbetrieb der Anlage entfallen.
- Belade-, Entlade-, Transport- und Behandlungszeiten werden für eine optimale Prozessführung bei angepassten aufeinander abgestimmten Aggregaten berechnet.
- Verwendung einer bedarfsgerechten Vakuumpumpe. Die optimierten Energiebilanzen werden für eine entsprechend optimal ausgelegte Pumpe berechnet.
 - * Istwert der Anschlussleistung der verwendeten Anlage: 12 kWh.
 - * Neu ausgelegte Pumpe für bestehende Anlage: Anschlussleistung 5 kWh.
 - * Neu ausgelegte Pumpe für eine Großanlage: Anschlussleistung 10 kWh.
- Durch den Batchbetrieb anfallende Leerlaufzeiten (z.T. auch versuchsbedingte Reparaturarbeiten oder Behebung von Anlagenfehlern) wurden stark reduziert und einem verbesserten logistischen Ablauf angepasst.
- Da bei einer größeren Anlage ein verbesserter Wirkungsgrad zu erwarten ist, werden weitere signifikante Energieeinsparungen angenommen:
 - * Material und Prozesswasser werden vorgewärmt aus aerober Vorerwärmung und Warmwasserspeicher aufgegeben.

- * Relative Energieverluste über Oberflächenabstrahlung werden bei einer größeren Anlage geringer.
- * Größeren Substratmassen zur Behandlung führen zu geringeren spezifischen energetischen Grundaufwendungen, die beim Betrieb der Anlage in jedem Fall anfallen.

Eine approximative Massen- und Energiebilanz ist in der Tabelle 6.4 zusammengestellt. Der Vollständigkeit halber ist hier auch der ansonsten in der vorliegenden Arbeit nicht betrachtete Schritt der Vakuum-Siede-Trocknung (VST) mit aufgenommen worden. Energieaufwendungen für eine Abwasserbehandlung und den Vergärungsprozess konnten im Rahmen der Vorversuche aufgrund bisher nicht ausreichend vorhandener Planungsgrundlagen nicht betrachtet werden.

Den größten Anteil des Energiebedarfs macht mit 64 kWh/Mg FS (70 % des Gesamtenergieaufwandes) die erforderliche thermische Energie aus. 29 % der Gesamtenergie entfallen auf die eigentliche Vakuum-Siede-Behandlung (17 % thermisch, 12 % elektrisch).

Wie bereits in den Kapiteln 4.5 und 4.4.6 beschrieben, sieht das Verfahrenskonzept eine Nutzung von Abwärme (z.B. aus dem BHKW-Betrieb) zur Deckung des thermischen Energiebedarfs vor. Die Bereitstellung der Wärmeenergie auf der Versuchsanlage durch eine Ölheizung ist dem Pilotcharakter der Anlage geschuldet. Wie in der Tabelle 6.4 ersichtlich, beträgt der Bedarf an thermischer Energie für eine optimierte Vakuum-Siede-Extraktion 64 kWh/Mg FS.

Gemäß den errechneten Energieerträgen aus den Pressaten der Vakuum-Siede-Extraktion sind thermische Energiegewinne von 120 - 145 kWh/Mg FS erreichbar (s. Tabelle 6.2). Laut Baumann [2010] von der STRABAG Umwelthanlagen GmbH, die über umfangreiche Referenzen und Erfahrungen im Bau von Nass- und Trocken-Fermentern im Abfallbereich verfügt, kann für die Aufrechterhaltung der Prozesstemperaturen im Anaerobfermenter im ungünstigen Fall etwa 20 % der BHKW-Abwärme veranschlagt werden. Selbst unter Abzug der für die Beheizung des Fermenters benötigten Wärmeenergie steht demnach ausreichend Wärmeenergie aus Abwärme zur Verfügung.

Der mit der Vakuum-Siede-Extraktion additional zu erzielende Gewinn an Biogas muss daher ausreichen einen elektrischen Mehraufwand von etwa 25,5 kWh sicher zu decken und zusätzliche Energiegewinne ermöglichen.

Tabelle 6.4: Approximative Massen- und Energiebilanz für eine optimierte großtechnische Anlage

Pos.	Vorgang	Masse [kg]	TS [%]	TS [kg]	H ₂ O [kg]	Temp. [°C]	Verweilzeit	Energieverbrauch [kWh th.]	Energieverbrauch/Mg [kWh el.]
1	Input Zwischenbunker	1000	50	500	500	10			
2	Abbau im Zwischenbunker	30		10	20		12 - 24h		3
3	Austrag aus Zwischenbunker	970	50,5	490	480	65			1
4	Eintrag in Vakuumstufe	970	50,5	490	480	65	15 Min.	15	11
5	Verlust in Vakuumstufe	960	51	490	470	65	30 Min.		
6	Austrag aus Vakuumstufe	960	51	490	470		15 Min.		
7	Eintrag in Extraktor	960	51	490	470	65			1
8	Flüssigkeitszugabe	960	2	20	960	70		29	2
9	Gesamtinhalt Extraktor	1920	26,5	510	1430	70	60 Min.	20	6,5
10	Entwässerung/Presswasseranfall	1404	14,2	200	1224	60			
11	Austrag Extrakt	516	60	310	206	60			1
Zwischensumme VSE									64
12	Eintrag in Zwischenpuffer	516	60	310	206	60			
13	Vakuumtrocknung	516	60	310	206	60	150 Min.	116	25,9
14	Trockengutaustrag	362	85	308	54	60			1
Summe VSE und VST									180
									52,4

6.1.5 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Die grundsätzliche technische Eignung der großtechnischen Versuchsanlage ist gegeben, auch wenn in verschiedenen Bereichen deutlicher Optimierungsbedarf besteht (vgl. Tabelle 6.1).

Die in den Versuchen erzielten Extraktionsleistungen liegen im unteren Bereich, wie sie beispielsweise mit dem Verfahren der Perkolation erzielt worden sind. Die CSB-Extraktionsleistungen der Perkolation gibt Santen [2007] mit 127 - 257 kg/Mg TS an.

Die Deckung der energetischen Aufwendungen einer vollständigen Vakuum-Siede-Behandlung (Extraktion und Trocknung des Pressrückstandes) ist mit den erreichten Extraktionsleistungen der Pilotanlage nicht zu bewerkstelligen. Für eine ausgeglichene Energiebilanz sind CSB-Frachten in einer Größenordnung von ca. 280 kg O₂/Mg TS bzw. 145 kg O₂/Mg FS Reaktor-Input nötig. Nach Vorlage der Ergebnisse aus den großtechnischen Versuchen wurde davon ausgegangen, dass durch die vorgesehenen Optimierungsschritte (vgl. Tabelle 6.1) diese erhöhten Energieausbeuten erreichbar wären. Ein wesentlicher Anteil der für den Vorbehandlungsprozess aufzuwendenden Energie ist Wärmeenergie. Zumindest für den im Rahmen der vorliegenden Arbeit zu untersuchenden Prozess der Vakuum-Siede-Behandlung konnte nachgewiesen werden, dass hierfür vorhandene Abwärme genutzt werden kann. Die Vakuum-Siede-Behandlung ist nur dann sinnvoll umzusetzen, wenn es gelingt, durch diese Vorbehandlung zusätzliche organische Komponenten in die Flüssigphase zu überführen. Diese müssen in der anschließenden Anaerobbehandlung zu Gaserträgen führen, die geeignet erscheinen den elektrischen Energieaufwand der Vorbehandlung zu decken und zusätzliche Energiegewinne zu ermöglichen.

Im Rahmen der hier betrachteten Versuche konnte keine wesentlichen Optimierungen der energetischen Aufwendungen vorgenommen werden. Diese wurden jedoch rechnerisch berücksichtigt (Tabelle 6.4).

Wie im Kapitel 4.4.6 beschrieben, war vorgesehen, die nach einer Vakuum-Siede-Behandlung extrahierbare organikreiche Suspension möglichst einem Hochleistungsfermenter (z.B. UASB-Reaktor) zuzuführen. Inwieweit ein derartiger Reaktortyp für die Vergärung der in den großtechnischen Versuchen gewonnenen organikreichen Suspension geeignet wäre und wie sich der im Pressat befindliche Trockensubstanzgehalt von 6,8 % bis 15 % (vgl. Massenbilanzen im Anhang A) auf diese Anaerobtechnologie auswirken würde, konnte im Rahmen der Versuche nicht untersucht werden. Substratabhängig wären möglicherweise weitere Aufbereitungsschritte erforderlich. Im Verlauf der Untersuchungen wurde deutlich, dass – je nach eingesetztem Sub-

strat und gewählter Behandlungsintensität – die Betriebsweise und Auslegung der Entwässerungsaggregate (hier Pressen) einen deutlichen Einfluss auf die Qualität der extrahierten Suspension haben.

Optimierungen der eigentlichen Vakuum-Siede-Behandlung nachgelagerter Prozessschritte wurden zurückgestellt, da zunächst der Einfluss des Aufschlussverfahrens auf organische Substrate hinreichend untersucht werden sollte.

Während des Vakuum-Siede-Prozesses entstehen zwangsläufig Kondensate. Im Verfahrensablauf der Pilotanlage sind zwei Kondensationsstellen installiert. In der ersten Kondensationsstufe fielen Kondensatmengen von 1,3 bis 2,9 % bezogen auf den Reaktor-Input (Feuchtsubstanz) an. In der zweiten Kondensatstufe wurden Kondensatmengen von 10 bis 13 % /FS Reaktor-Input gemessen. Das Kondensat dieser Stufe enthielt CSB-Konzentrationen zwischen 5.000 und 11.900 mg O₂/l. Die Analysen des Kondensates der zweiten Stufe wiesen stark unterschiedliche Werte auf. Die gemessenen CSB-Konzentrationen schwankten von 1.670 mg O₂/l bis 53.603 mg O₂/l. Die starken Schwankungen sind vermutlich auf ein unterschiedliches Durchmischungsverhalten des Prozesswassers mit dem Kondensat 2 und Rückständen (Bodensatz) im Vorlagebehälter zurückzuführen. Die Kondensate werden bei der Extraktion als Prozesswasser zur Anmischung des behandelten Substrates nach der Vakuum-Siedebehandlung genutzt, die enthaltene CSB-Fracht somit in den Vergärungsprozess überführt.

Die Vakuum-Siede-Extraktion konnte weitgehend abluftfrei ($<1 \text{ m}^3/\text{Mg}$ Abfall-Input) durchgeführt werden. Neben diesen Abluftvolumina kam es im Prozessverlauf zu im Probetrieb nicht erfassbaren Abluftemissionen – im Wesentlichen mit Organik belasteter Wasserdampf.

Im Verlauf der Versuche an der großtechnischen Anlage wurde deutlich, dass in diesem Maßstab und der nur eingeschränkten Eignung für Probenahme und Aufnahme von Messwerten eine Durchführung von Reihenuntersuchungen nicht möglich ist. Aufgrund der anlagenbedingten Massenverluste – insbesondere zurückzuführen auf Rückstände im Reaktor, in den Pressen und Fördereinrichtungen – war eine geschlossene Massenbilanzierung deutlich erschwert (vgl. Massenbilanzen im Anhang A).

Eine wissenschaftlich abgesicherte Untersuchung des neuartigen Verfahrensschrittes der Vakuum-Siede-Behandlung und der Auswirkung auf das Aufschlussverhalten organischer Stoffströme sowie einer damit einhergehenden Erhöhung der Verfügbarkeit für einen nachfolgenden Anaerobprozess ist nach Auswertung der Ergebnisse und Erfahrungen mit der großtechnischen Anlage nicht möglich.

Weitergehende Untersuchungen wurden daher im halbtechnischen und labortechnischen Maßstab geplant und durchgeführt.

6.2 Halbtechnische Versuche

6.2.1 Allgemeine Angaben

Im Rahmen der halbtechnischen Versuche sollte die Wirksamkeit der Vakuum-Siede-Extraktion auf ihre Eignung zur Vorbehandlung organischer Substrate hin untersucht werden. Hierzu wurden Reihenversuche mit unterschiedlichen Verfahrens- und Substratvarianten durchgeführt.

Neben der Untersuchung der grundsätzlichen Leistungsfähigkeit der Vakuum-Siede-Behandlung war es die Zielsetzung Aussagen über die Wirksamkeit und das Zusammenwirken der einzelnen Prozessparameter (Verhältnis von Substrat und Prozesswasser, Behandlungstemperatur, Vakuumeinfluss und Maischbehandlung) sowie der Phasentrennung nach der Vakuum-Siede-Behandlung zu erarbeiten.

Nach einer genaueren Charakterisierung der Ausgangssubstrate werden die Ergebnisse der Versuchsvarianten präsentiert und diskutiert. Die Auswertung der Ergebnisse für die Versuchsvarianten mit Maissilage erfolgt nach den Auswirkungen der einzelnen Prozessparameter. Die Ergebnisse der Versuche mit Bioabfällen und der Zusatzversuche schließen sich an.

Im Anhang abgedruckte Tabellen und Abbildungen zu den halbtechnischen Versuchen sind in den Verweisen mit einem B gekennzeichnet.

Die Güte einer Verfahrensvariante im Sinne der Fragestellung der vorgelegten Arbeit ist grundsätzlich davon abhängig, wie groß die Extraktionsleistung nach einer Vorbehandlung unter den gewählten Prozessbedingungen ausfällt. Die Extraktionsleistung der Behandlungsvarianten ist als Maß der in das Pressat überführten Organik zu verstehen. Als Parameter hierfür dienen die überführte oTS- und CSB-Frachten sowie die mit dem Pressat erreichbare Gasbildung in Bezug auf die Gehalte und Frachten der organischen Komponenten bzw. Gasbildungsraten der Ausgangssubstrate.

Ein Teil der durchgeführten Versuche waren Bestandteile einer Diplomarbeit [Liebeneiner, 2006] und einer Studienarbeit [Fischer, 2006]. Die hier gewonnenen Daten sind in die Ergebnisauswertung eingeflossen.

6.2.2 Ausgangssubstrat Maissilage

Im Verlauf der halbtechnischen Versuche wurden insgesamt sechs Substratchargen (A - F) als Input-Substrat verwendet. Die Substrate wurden vor Versuchsbeginn auf die Parameter TS, oTS, CSB und GB₁₀ hin analysiert (Tabelle 6.5). Auf Grundlage der eingesetzten Input-Massen pro Versuch ergeben sich die Frachten zu den

Parametern FS, TS, oTS und CSB (Tabelle B.1). Aufgrund der identischen Einwaagen des Input-Substrates innerhalb der Versuchswiederholungen sind dort keine Standardabweichungen angegeben.

Tabelle 6.5: Konzentrationen und Gasbildungsraten der Input-Substrat-Chargen - Maissilage

Substrat	TS [%]	TS [%]	oTS [%]	oTS [%]
Charge	MW	STABW	MW	STABW
A	37,67	1,02	95,84	0,04
B	37,78	0,98	96,12	0,22
C	37,90	0,87	95,92	0,22
D	38,47	1,01	95,60	0,01
E	39,16	0,95	95,74	0,17
F	37,80	0,97	95,84	0,24
	CSB [mg O_2 /g TS]		GB_{10} [Nl/kg oTS]	
	MW	STABW	MW	STABW
A	1.026,5	41,2	271,0	24,1
B	1.058,4	30,4	263,5	27,2
C	1.037,7	39,4	278,9	12,9
D	1.041,1	63,4	272,6	19,7
E	1.039,3	71,4	278,1	18,2
F	1.029,9	42,7	262,9	20,8

6.2.3 Korrelation der Analysedaten der Pressate - Maissilage

Die Summenparameter oTS und CSB können für eine Quantifizierung des Organikgehalts genutzt werden. Die Gasbildungsraten werden in der Ergebnisdarstellung als GB_{10} ausgedrückt und sollten über eine Funktion des in das Pressat überführten Organikgehalts darstellbar sein. Die Regressionsgeraden in der Abbildung 6.3 haben Bestimmtheitsmaße (R^2) $> 0,9$ und weisen somit auf eine gute Korrelation der analysierten Parameter hin. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden daher in der Ergebnisdiskussion nicht alle Konzentrationen und Frachten miteinander verglichen. Stellvertretend für die in das Pressat überführte organische Fracht wird die CSB-Fracht aufgeführt. Die Konzentrationen der Parameter TS, oTS und CSB sind jeweils in der Ergebnisdiskussion oder im Anhang B in Diagrammen wiedergegeben.

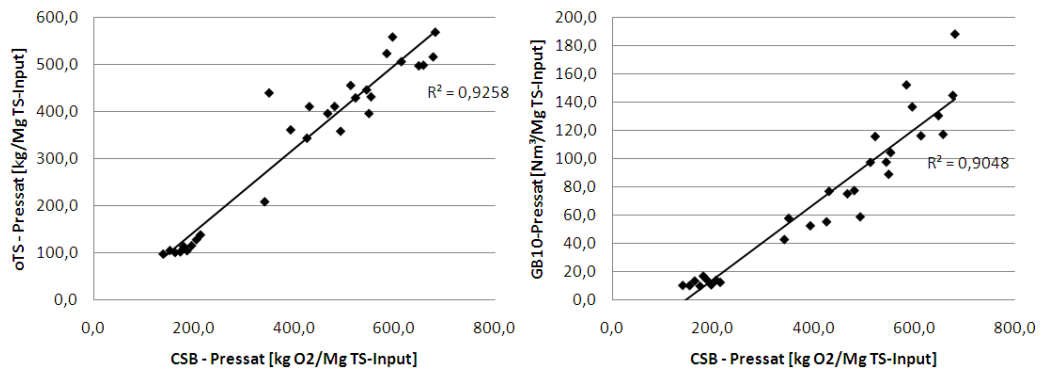


Abbildung 6.3: Lineare Regression zwischen oTS- und CSB-Gehalt sowie GB₁₀ und CSB-Fracht der Pressate - Maissilage

6.2.4 Extraktionsleistung der Versuchsvarianten - Maissilage

Aus den Substratmassen, Konzentrationen und hieraus errechneten Frachten (Tabellen B.3 bis B.6) lassen sich für die jeweiligen Versuchsvarianten die anteilig extrahierten organischen Inhaltsstoffe errechnen – ausgedrückt als prozentuale Werte der oTS-, CSB- und GB₁₀-Frachten der Ausgangssubstrate (Abbildung 6.4 und Tabelle B.10).

Die Ergebnisse weisen auf bessere Extraktionsergebnisse mittels der Schneckenpresse als mit der Stempelpresse hin und lassen einen positiven Einfluss erhöhter Prozesswassermassen hinsichtlich der extrahierten CSB-Fracht und der Gasbildungs-raten erkennen. Die Einflüsse der untersuchten Prozessparameter

- eingesetztes Pressaggregat,
- Prozesswassermasse,
- Intensität der thermischen Behandlung,
- Intensität der Vakuum-Siede-Behandlung und
- Intensität der Maisch-Behandlung

auf die Extraktion organischer Komponenten in die Flüssigphase und die Vergärbarkeit des Pressates werden in den folgenden Kapiteln separat betrachtet (Kapitel 6.2.5 bis 6.2.9). Aufgrund der homogenen Input-Substrate der Maissilage-Versuche (vgl. Tabelle 6.5) erfolgt die Darstellung und Diskussion der Auswirkungen der variierten Prozessparameter auf die Extraktionsleistung sowie die Konzentrationen und

Frachten der jeweiligen Versuchsvarianten ohne einen Bezug auf die Ausgangssubstrate. Diese Darstellungsform wurde gewählt, da so ein besserer direkter Vergleich der Analysewerte und der hieraus errechneten Frachten möglich ist.

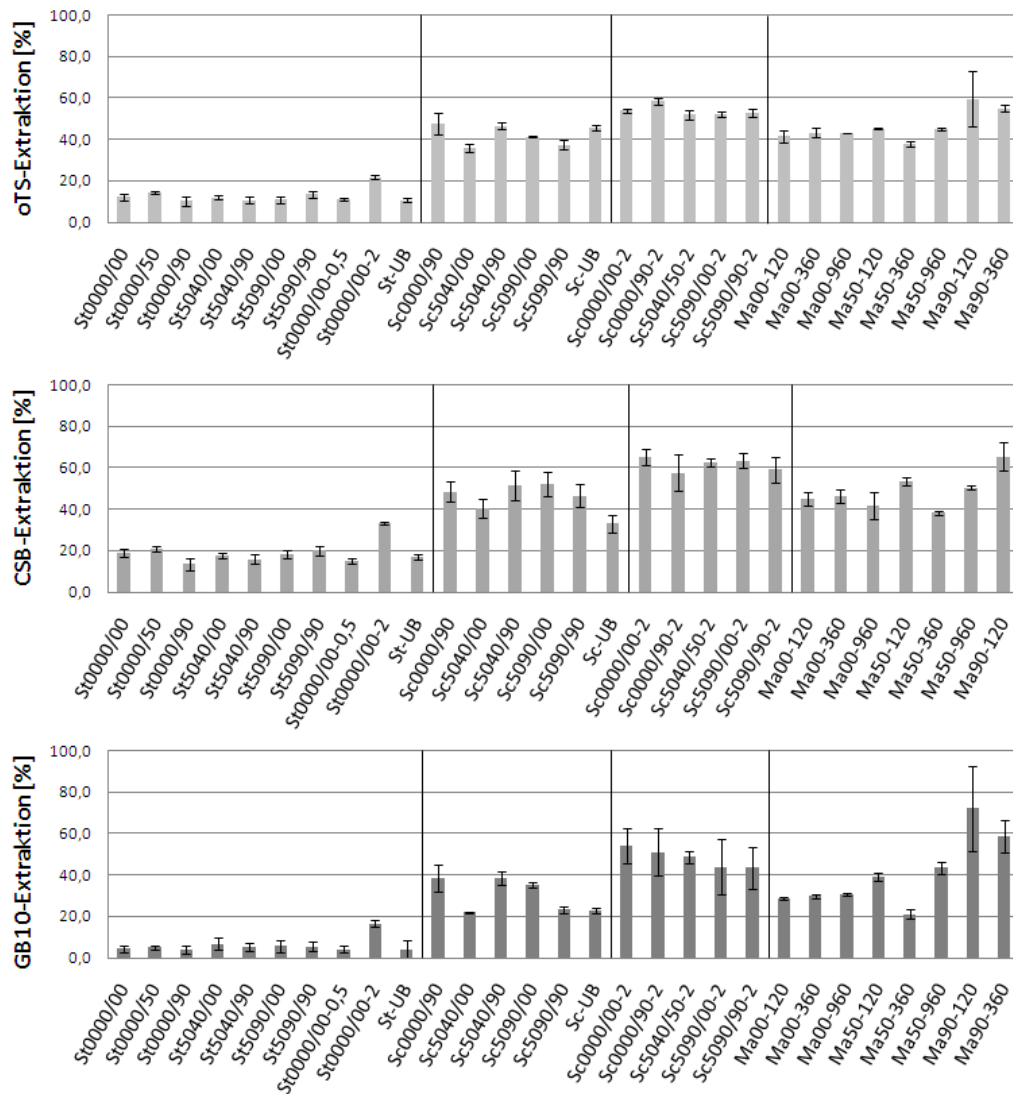


Abbildung 6.4: Anteilige Extraktion organischer Inhaltsstoffe aus den Ausgangssubstraten in das Pressat - Maissilage

6.2.5 Auswirkung des Pressaggregats auf die Extraktionsleistung - Maissilage

Es liegen Ergebnisse zum Einfluss des eingesetzten Pressaggregats auf die Extraktionsleistung aus jeweils vier Versuchsvarianten vor. Die betrachteten Varianten enthält die Tabelle 6.6.

Tabelle 6.6: Versuchsvarianten zur Bestimmung des Einflusses des Pressaggregates - Maissilage

Versuch	Massenverhältnis	Vakuum-Siede-Behandlung			Maische		Presse
	Wasser/Silage	[mbar]	[°C]	[min]	[°C]	[min]	
St0000/90	1/1	-	-	-	90	30	Stempel
Sc0000/90	1/1	-	-	-	90	30	Schnecke
St5090/90	1/1	50	90	30	90	30	Stempel
Sc5090/90	1/1	50	90	30	90	30	Schnecke
St5040/90	1/1	50	40	30	90	30	Stempel
Sc5040/90	1/1	50	40	30	90	30	Schnecke
St-UB	1/1	-	-	-	-	-	Stempel
Sc-UB	1/1	-	-	-	-	-	Schnecke

Die in der Abbildung 6.5 dargestellten Pressatausbeuten in Bezug auf das Input-Äquivalent eines Mg Trockensubstanz Silage sowie die TS-Gehalte des Pressrückstandes zeigen, dass mittels der Schneckenpresse deutlich höhere Pressleistungen im Sinne größerer Pressatausbeuten erzielt werden konnten. Auffällig sind die annähernd gleichen Pressatausbeuten des zweiten Wertepaares (St5090/90, Sc5090/90) bei deutlichen unterschiedlichen Trockensubstanzgehalten der Pressrückstände. Diese Abweichungen können darauf zurückgeführt werden, dass die Entwässerung des Substrates mit der Stempelpresse zu einer ungleichmäßigen Entwässerung innerhalb der jeweiligen Presschargen führte (vgl. Kapitel 5.3.4). Dieser Effekt ist insbesondere bei intensiv vorbehandelten Substraten erkennbar.

Die Abbildung 6.6 verdeutlicht den Einfluss des verwendeten Pressaggregates auf den TS-Gehalt der Pressate und zeigt ebenfalls einen Einfluss auf den oTS-Gehalt der extrahierten Pressate. Die TS-Gehalte der Flüssigphasen aus der Schneckenpresse sind zwei bis dreimal so hoch wie in den Flüssigphasen aus der Stempelpresse und liefern neben der stärkeren Entwässerung der Feststoffe eine weitere Erklärung für die größeren Pressatmassen.

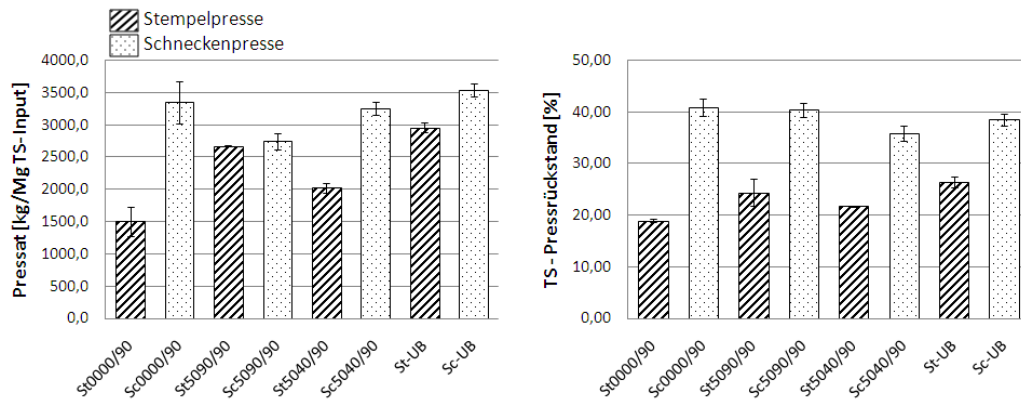


Abbildung 6.5: Einfluss des Pressaggregats auf die Pressatausbeute und den TS-Gehalt des Pressrückstandes

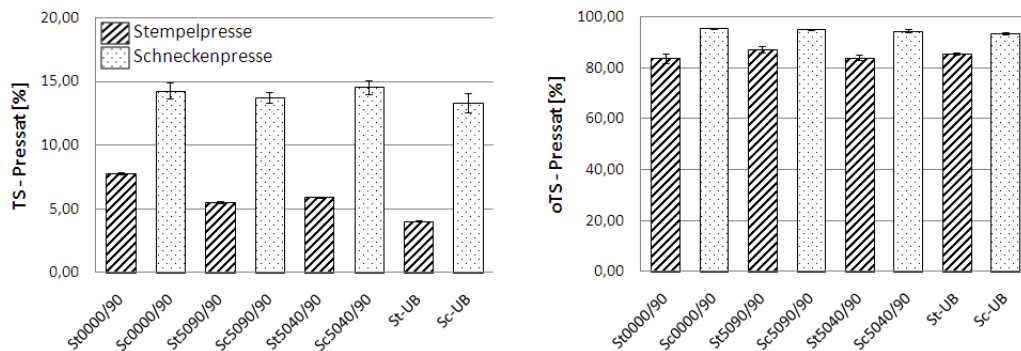


Abbildung 6.6: Einfluss des Pressaggregats auf TS- und oTS-Gehalt des Pressats

Auffällig ist der größere Schwankungsbereich der durch die Stempelpresse erzielten TS-Gehalte. Dieser ist zurückzuführen auf den höheren Einfluss der Struktur der Pressate auf die Pressleistung dieses Aggregats. Die intensiver behandelten Varianten wiesen eine „breiige“ Konsistenz in Folge der Auflösung und Verkleisterung durch die druck-thermische und mechanische bzw. rein thermisch-mechanische Behandlung auf. Die mit der Stempelpresse erzeugten Pressate dieser Varianten enthalten aufgrund des stärkeren Aufschlusses und zunehmender Zerfaserung höhere TS-Gehalte als die weniger stark behandelten. Zwischen den mit der Schneckenpresse erzielten Ergebnissen besteht kein derart großer Unterschied in den TS-Gehalten der Pressate, da die Pressleistung dieses Aggregates offenbar weniger von Strukturänderungen der Suspension abhängig ist.

Die oTS-Gehalte bei Verwendung der Schneckenpresse liegen, unabhängig von der

Behandlung, bei etwa 94 - 95 %. Die mittels der Stempelpresse erzeugten Pressate streuen um 85 %, sodass hiermit im Vergleich zur Schneckenpresse prozentual mehr anorganische Bestandteile extrahiert wurden. Die vermehrte Extraktion anorganischer Komponenten mittels der Stempelpresse, ist durch deren geringeren Pressdruck und die dadurch bedingte schlechtere Abtrennung einer organikreicher Flüssigphase zu erklären. Die stärker an die organische Festsubstanz gebundene Flüssigkeit verbleibt in höherem Maße im Pressrückstand. Besser abgetrennt wird das schwach gebundene Wasser. Dieses ist aufgrund der hohen Löslichkeit anorganischer Komponenten (Salze) prozentual höher mit Anorganik beladen.

Ein ähnliches Bild wie für die oTS-Ergebnisse zeigt sich auch für den Vergleich der CSB-Konzentrationen und -Frachten in den Pressaten (Abbildung 6.7). Deutlich zu erkennen ist ein erhöhter CSB-Gehalt in den Pressaten nach Einsatz der Schneckenpresse. Mit bis zu über 100 % fällt die Steigerung besonders bei den intensiver behandelten Versuchspaaren auf (St5090/90, Sc5090/90 und St5040/90, Sc5040/90). Im Vergleich dazu weisen die Pressate aus weniger stark vorbehandelten Substraten der Varianten St0000/90, Sc0000/90 und St-UB, Sc-UB eine geringere Steigerung der CSB-Konzentration von etwa 65 % auf. Resultierend aus den höheren CSB-Gehalten in den Pressaten ergeben sich, durch den Einsatz der Schneckenpresse, um mehr als 200 % erhöhte CSB-Frachten.

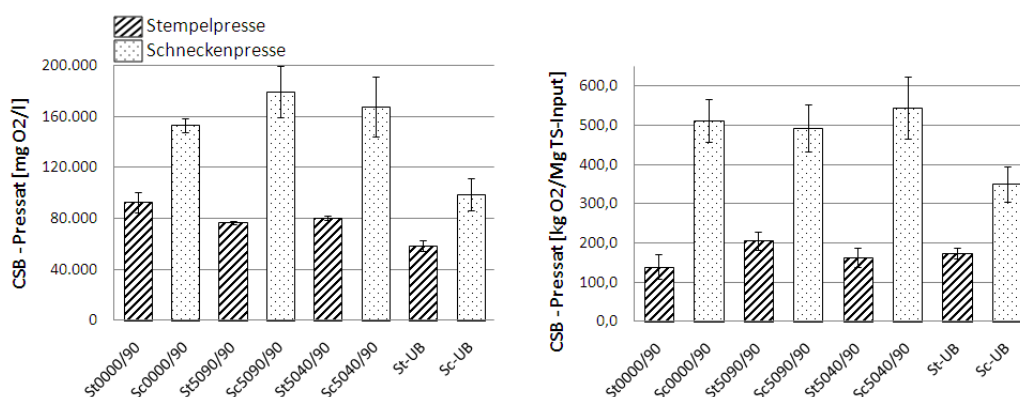


Abbildung 6.7: Einfluss des Pressaggregats auf den CSB-Gehalt und die CSB-Fracht des Pressats

Es wird angenommen, dass die stärkere mechanische Beanspruchung der Substrate durch die Schneckenpresse auch die fester gebundene und stärker organisch-angereicherte Flüssigkeit der Substratsuspension extrahiert und dieser Effekt durch eine intensivere thermische Vorbehandlung begünstigt wird.

Die CSB-Konzentrationen und -Frachten weisen erwartungsgemäß darauf hin, dass höhere TS-Werte in den Pressaten zu höheren CSB-Konzentrationen führen. Dieser Zusammenhang bestätigt sich auch für die übrigen Versuchsvarianten (vgl. folgende Kapitel).

Die Auswirkung des Pressaggregats auf den CSB spiegelt sich auch in den oTS-spezifischen Gasausbeuten und den errechneten Bezugswerten auf 1 Mg TS-Input Silage wieder (Abbildung 6.8). Bedingt durch die größeren Massen an Pressat nach der Schneckenpresse und die erhöhten oTS-Frachten fallen die Unterschiede der Gasbildungs-raten in Bezug auf 1 Mg TS-Input Silage deutlicher aus, sodass sich die Werte bis nahezu um einen Faktor von zehn unterscheiden.

Das Pressaggregat hat nach den vorliegenden Ergebnissen einen deutlichen Einfluss auf die Extraktionsleistung und damit auf die erreichbare spezifische Gasbildung. Ob das Pressat ohne weitere Behandlung und Aufreinigung einem Hochleistungsreaktor (z.B. Typ UASB) zugeführt werden könnte, wurde nicht untersucht. Aufgrund makroskopisch erkennbarer Feststoffpartikel ist dies jedoch zu bezweifeln. Hierzu wären höchstwahrscheinlich Optimierungsmaßnahmen an der Presse und/oder eine nachträgliche Abtrennung von Feststoffpartikeln erforderlich.

Ein möglicher Erklärungsansatz für die geringeren Gasausbeuten der Variante Sc5090/90 kann indirekt die erhöhte TS-Konzentration in den Pressaten der intensiv behandelten Varianten liefern. Durch ein Absinken der Feststoffe kam es in diesen Pressaten vergleichsweise rasch zu einer Phasentrennung mit erhöhten TS-Konzentrationen im Bodensatz. Es ist daher trotz intensiver Durchmischung nicht auszuschließen, dass bei der Probenahme für die Gäransätze ein organisch geringer befrachteter Anteil überrepräsentiert wurde. Aufgrund der übrigen Ergebnisse wird nicht davon ausgegangen, dass ein verfahrensbedingter Effekt vorliegt.

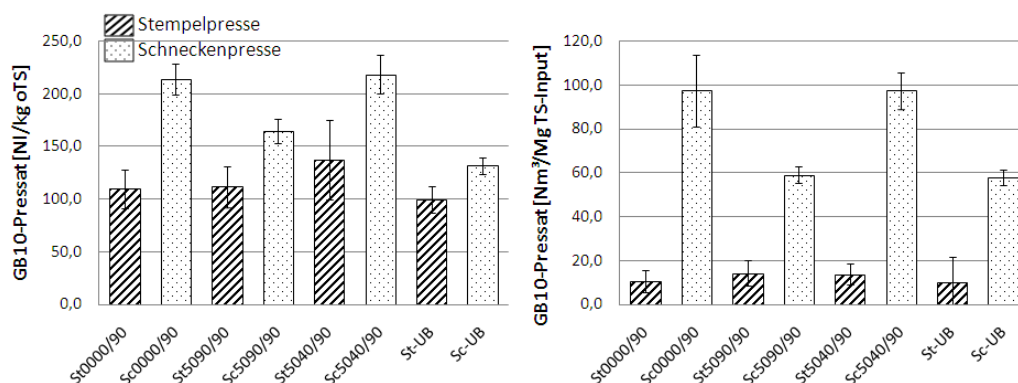


Abbildung 6.8: Einfluss des Pressaggregats auf die Gasausbeute aus dem Pressat

6.2.6 Auswirkung der Prozesswassermasse auf die Extraktionsleistung - Maissilage

Die zur Bestimmung des Einflusses der eingesetzten Prozesswassermasse verglichenen Versuchsvarianten enthält die Tabelle 6.7.

Tabelle 6.7: Versuchsvarianten zur Bestimmung des Einflusses der Prozesswassermasse - Maissilage

Versuch	Massenverhältnis	Vakuum-Siede-Behandlung			Maische		Presse
	Wasser/Silage	[mbar]	[°C]	[min]	[°C]	[min]	
St0000/00	1/1	-	-	-	-	30	Stempel
St0000/00-0,5	1/2	-	-	-	-	30	Stempel
St0000/00-2	2/1	-	-	-	-	30	Stempel
Sc5090/90	1/1	50	90	30	90	30	Schnecke
Sc5090/90-2	2/1	50	90	30	90	30	Schnecke
Sc0000/90	1/1	-	-	-	90	30	Schnecke
Sc0000/90-2	2/1	-	-	-	90	30	Schnecke

Die mit einer in Bezug auf die Silage-Input-Masse verdoppelten Prozesswassermasse erzielten Pressatmassen liegen bis zu 140 % über den Vergleichsvarianten. Diese Zunahme ist nicht nur durch die verdoppelte Wassermasse zu erklären. Die TS-Gehalte der Pressate aus den Versuchen mit verdoppelter Prozesswasserzugabe sind nicht einfach nur verdünnt (halbiert), sondern liegen bei mindestens 60 % der TS-Gehalte der Vergleichsvarianten (im Vergleich von St0000/00 und St0000/00-2 sogar bei 79 %). Die erhöhten Pressatmassen sind demnach auch die Folge einer erhöhten Extraktion an Feststoffen (Trockensubstanz). Diese verschlechterte Fest-Flüssig-Trennung ist tendenziell auch an den etwas niedrigeren TS-Gehalten der Pressrückstände erkennbar (Abbildung 6.9). Die Variante mit einem Wasser/Silage-Verhältnis von 1/2 erbrachte erwartungsgemäß hinsichtlich der Frachten und Gasbildungsrate bezogen auf 1 Mg TS-Input vergleichsweise geringe Werte.

Die TS-Konzentrationen der Pressate korrelieren bei beiden Pressaggregaten erwartungsgemäß deutlich mit den verwendeten Prozesswassermassen; der Einfluss auf die oTS-Konzentrationen fällt gering aus. Lediglich die Konzentration organischer Trockensubstanz der Variante mit weniger Prozesswasser ist im Vergleich zu den anderen Varianten, die mit der Stempelpresse entwässert wurden, leicht erhöht (Abbildung B.1).

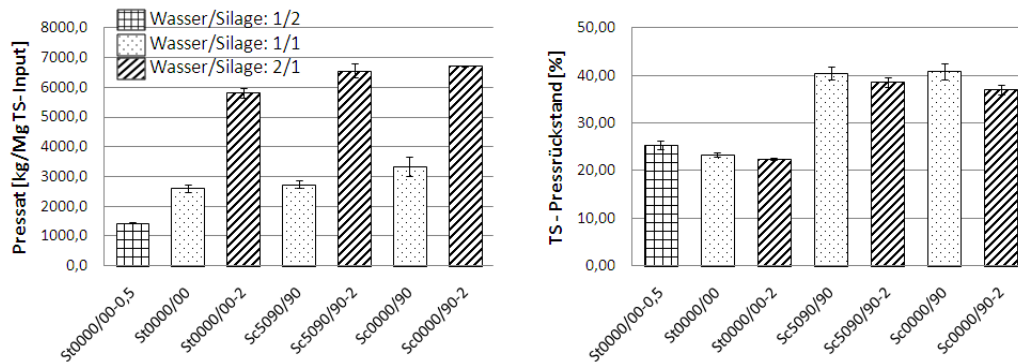


Abbildung 6.9: Einfluss der Prozesswassermasse auf die Pressatausbeute und den TS-Gehalt des Pressrückstandes

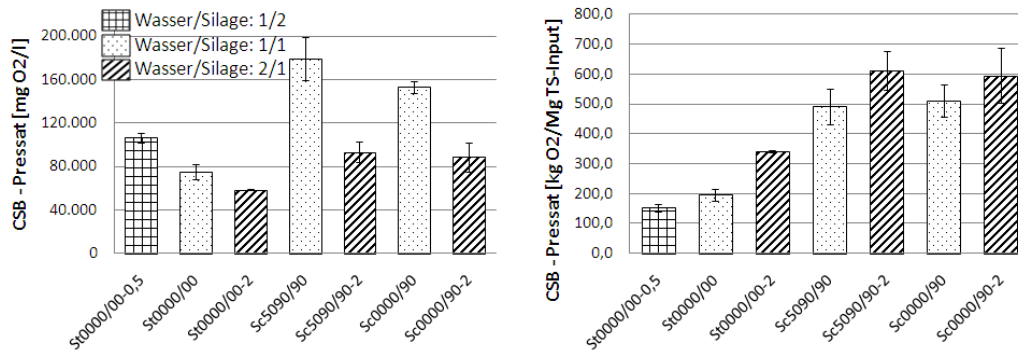


Abbildung 6.10: Einfluss der Prozesswassermasse auf den CSB-Gehalt und die CSB-Fracht des Pressats

Die Verdopplung der Wassermasse führt zu deutlich geringeren CSB-Konzentrationen (Abbildung 6.10). Auch hier liegt jedoch keine reine Verdünnung vor, da die Konzentrationen über 50 % (bis zu 78 %) der Vergleichsvarianten betragen. Durch eine Verdopplung der Prozesswassermasse kommt es demnach zu einer verstärkten Extraktion an CSB-wirksamer Organik, die zusammen mit den erhöhten Pressatmassen (vgl. Abbildung 6.9) zu deutlich erhöhten CSB-Frachten führt (116 - 174 % der Vergleichsvarianten). Unter Berücksichtigung der TS-Konzentrationen sind die erhöhten Organik-Frachten offenbar im Wesentlichen durch eine höhere Auswaschung organischer Feststoffe (bzw. eine verschlechterte Fest-Flüssig-Trennung) bedingt.

Die Gasbildungsdaten weisen zum Teil erhebliche Standardabweichungen auf. Anhand der angegebenen Mittelwerte der spezifischen Gasbildungsdaten [Nl/kg oTS] ist jedoch der Trend erkennbar, dass die Varianten mit erhöhten Prozesswassermassen

sen erhöhte spezifische Gasbildungsraten liefern. Dies kann mit der zuvor diskutierten erhöhten CSB-Extraktion dieser Versuchsvarianten erklärt werden (vgl. Abbildung 6.10). Die Gasbildung in [m^3 / Mg TS-Input] ist – wie auch die CSB-Fracht – abhängig von den anfallenden Pressatmassen. Demnach wird der zuvor beobachtete Effekt hier noch verstärkt (Abbildung B.2).

6.2.7 Auswirkung der Intensität der Vakuum-Siede-Behandlung auf die Extraktionsleistung - Maissilage

Die zur Bestimmung des Einflusses der Intensität der Vakuum-Siede-Behandlung vergleichbaren Versuchsvarianten sind in der Tabelle 6.8 wiedergegeben. Im Rahmen dieses Unterkapitels werden lediglich die Auswirkungen der unterschiedlich Behandlungstemperaturen in einer Vakuum-Siede-Behandlung sowie der zusätzliche Einfluss der Maische verglichen. Ein Vergleich dieser Varianten mit unbehandelten und nicht vakuum- und/oder wärme-behandelten Varianten erfolgt im Kapitel 6.2.9.

Tabelle 6.8: Versuchsvarianten zur Bestimmung des Einflusses der Intensität der Vakuum-Siede-Behandlung - Maissilage

Versuch	Massenverhältnis	Vakuum-Siede-Behandlung			Maische		Presse
	Wasser/Silage	[mbar]	[°C]	[min]	[°C]	[min]	
St5040/00	1/1	50	40	30	-	30	Stempel
St5090/00	1/1	50	90	30	-	30	Stempel
St5040/90	1/1	50	40	30	90	30	Stempel
St5090/90	1/1	50	90	30	90	30	Stempel
Sc5040/00	1/1	50	40	30	-	-	Schnecke
Sc5090/00	1/1	50	90	30	-	-	Schnecke
Sc5040/90	1/1	50	40	30	90	30	Schnecke
Sc5090/90	1/1	50	90	30	90	30	Schnecke

Die Ergebnisse der Pressatausbeuten zeigen eine Werteverteilung, die keine eindeutigen Schlussfolgerungen zulässt (Abbildung 6.11). Erkennbar ist, dass die zusätzlich zur Vakuum-Siede-Behandlung in einer Heißmaische (90°C) behandelten Substrate tendenziell geringere Pressatausbeuten liefern, da sich vermutlich die intensive zusätzliche thermische und mechanische Behandlung in der Maische negativ auf die Abpressbarkeit auswirkt. Der Anteil an fester gebundener Flüssigkeit scheint bei den thermisch intensiver behandelten Substraten durch die abnehmende Struktur

(Verkleisterung der Stärke) zuzunehmen. Auffällig ist abermals die vergleichsweise geringe Pressatausbeute der Variante Sc5090/90, die sich nur zum Teil durch eine verringerte TS-Fracht erklären lässt und den gleichzeitig hohen mittleren TS-Gehalt der Pressrückstände dieser Variante unerklärbar macht (vgl. auch Kapitel 6.2.5).

Die Pressate, die zusätzlich zur Vakuum-Siede-Behandlung einer Heißmaische unterzogen wurden, weisen insbesondere nach Einsatz der Schneckenpresse erhöhte TS-Gehalte auf. Dies ist durch die Überführung größerer Massen an stark aufgefaserter Maissilage in die Flüssigphase zu erklären, die bereits während der Versuchsführung visuell erkennbar war. Die oTS-Gehalte sind weitgehend unbeeinflusst von der Intensität der hier untersuchten Vorbehandlungsschritte (Abbildung B.3).

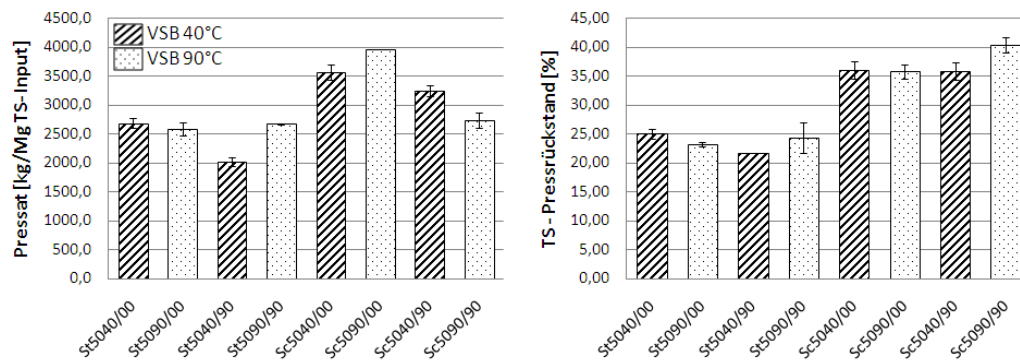


Abbildung 6.11: Einfluss der Vakuum-Siede-Behandlung auf die Pressatausbeute und den TS-Gehalt des Pressrückstandes

Als direkte Folge der erhöhten TS-Gehalte im Pressat ist, insbesondere bei den Varianten mit der Schneckenpresse, ein deutlicher Anstieg der CSB-Konzentrationen und Gasausbeuten mit zunehmender – insbesondere thermischer – Intensität der Vorbehandlung erkennbar (Abbildung 6.12). Einzig die Gasbildungsrate der Variante Sc5090/90 weicht von diesem Trend ab. Die Versuche dieser Variante haben trotz geringerer TS-Konzentrationen die höchsten CSB-Konzentrationen, die aber zu vergleichsweise geringen Gasausbeuten führen. Die geringere CSB-Fracht ist durch die geringere Pressatausbeute dieser Variante zu erklären.

Die Gasbildungsraten der mit der Schneckenpresse erzeugten Pressate steigen mit zunehmender Behandlungsintensität der Vakuum-Siede-Behandlung an. Die Gasbildungsraten der Varianten mit Stempelpresse bezogen auf 1 kg oTS im Pressat weichen ebenso wie die Gasbildungsraten bezogen auf 1 Mg TS-Input nur geringfügig voneinander ab (Abbildung 6.13).

Der Einfluss der Vakuum-Siede-Behandlung und des teilweise nachgeschalteten

Maischprozesses wird im Kapitel 6.2.9 nochmals diskutiert. Die Ergebnisse der hier betrachteten Varianten deuten auf einen Einfluss des Maischverfahrens hin, der mit den im folgenden Kapitel 6.2.8 verglichenen Varianten untersucht wurde.

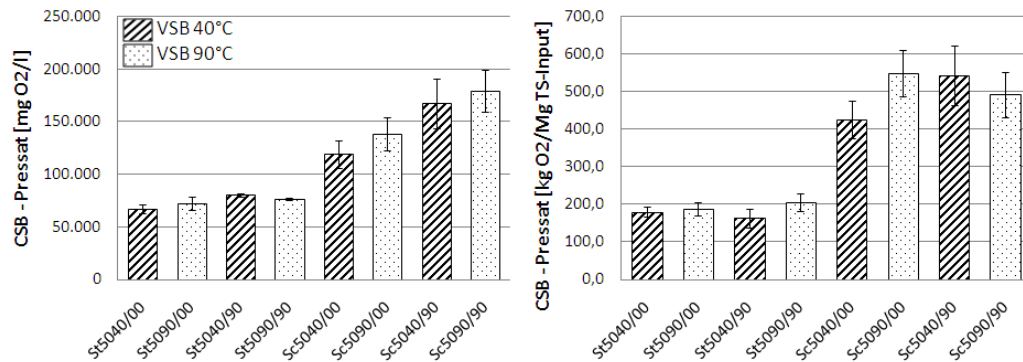


Abbildung 6.12: Einfluss der Vakuum-Siede-Behandlung auf den CSB-Gehalt und die CSB-Fracht des Pressats

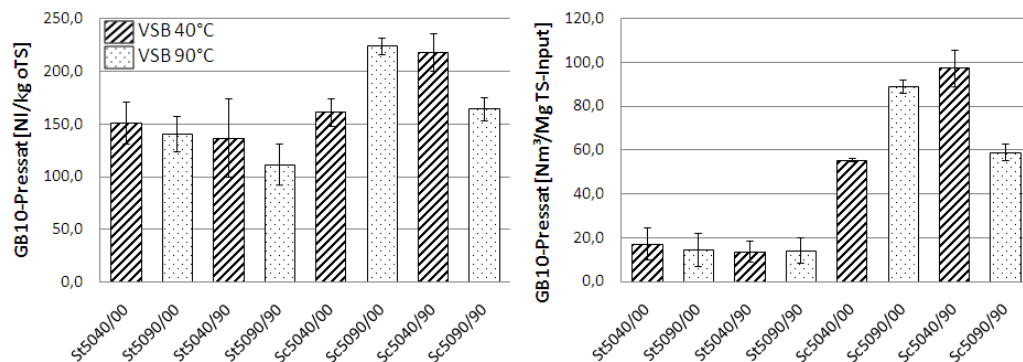


Abbildung 6.13: Einfluss der Vakuum-Siede-Behandlung auf die Gasausbeute aus dem Pressat

6.2.8 Auswirkung der Intensität der Maisch-Behandlung auf die Extraktionsleistung - Maissilage

Die Untersuchung des Einflusses einer alleinigen Maische unterschiedlich langer Dauer und Erwärmung auf das Extraktionsergebnis erfolgte anhand der in der Tabelle 6.9 aufgeführten Varianten. Aufgrund des positiven Einflusses einer erhöhten Masse an Prozesswasser auf die Extraktionsleistung (vgl. Kapitel 6.2.6) wurde das Wasser/Silage-Verhältnis von 2/1 gewählt. Verglichen werden Versuchsvarianten oh-

ne Erwärmung (Kaltmaische), Varianten mit einer Temperierung auf 50 °C (Warmmaische) und auf 90 °C (Heißmaische).

Tabelle 6.9: Versuchsvarianten zur Bestimmung des Einflusses der Intensität der Maisch-Behandlung - Maissilage

Versuch	Massenverhältnis	Vakuum-Siede-Behandlung			Maische		Presse
	Wasser/Silage	[mbar]	[°C]	[min]	[°C]	[min]	
Sc0000/00-2	2/1	-	-	-	-	30	Schnecke
Ma00-120	2/1	-	-	-	-	120	Schnecke
Ma00-360	2/1	-	-	-	-	360	Schnecke
Ma00-960	2/1	-	-	-	-	960	Schnecke
Ma50-120	2/1	-	-	-	50	120	Schnecke
Ma50-360	2/1	-	-	-	50	360	Schnecke
Ma50-960	2/1	-	-	-	50	960	Schnecke
Sc0000/90-2	2/1	-	-	-	90	30	Schnecke
Ma90-120	2/1	-	-	-	90	120	Schnecke
Ma90-360	2/1	-	-	-	90	360	Schnecke

Die Pressatausbeuten variieren über die gewählten Varianten mit veränderter Maischtemperatur und -dauer nur geringfügig. Die Mittelwerte liegen für alle Versuchsvarianten bei etwa 6.500 kg/Mg TS (Abbildung B.4). Lediglich die 30-minütige Kaltmaische (Sc0000/00-2) führt zu leicht erhöhten Pressatausbeuten. Dieses Ergebnis belegt die bereits zuvor diskutierte leichte Verschlechterung der Abpressbarkeit bei zunehmender Behandlungsintensität aufgrund einer vermehrten Auffaserung der Substrate (vgl. Kapitel 6.2.7).

Der TS-Gehalt der Pressrückstände bei Kalt- und Warmmaische verringert sich bis auf Variante Sc0000/00-2 mit zunehmender Behandlungszeit und bestätigt die Abnahme der Abpressbarkeit (Abbildung B.4). Die Abpressleistung, ausgedrückt als Trockensubstanzgehalt des Pressrückstandes, sinkt bei längeren Behandlungszeiten (> 6 h) um ca. 15 % im Vergleich zu den kürzer behandelten Varianten.

Die Varianten mit einer Heißmaische liefern andere Ergebnissen. Bereits nach 30-minütiger Behandlung ergibt sich ein recht niedriger TS-Gehalt von 37 % im Pressrückstand, der sich jedoch bei zunehmender Behandlungsintensität erhöht. Nach 6-stündiger Behandlung werden höhere TS-Werte erzielt, als bei den Vergleichsvarianten. Dieser Effekt kann durch das Verkleistern der Maisstärke bei Temperaturen ab 65 °C zu erklären sein. Laut Yuan et al. [2007] kommt es unterhalb dieser Tempera-

tur nur in geringerem Umfang zum Aufquellen der Stärke (s. auch Anonym [1998] und Kapitel 3.2.1). Die Verkleisterung führt zu einer Verringerung des TS-Gehalts im Pressrückstand. Erkennbar wird dies durch den niedrigen TS-Gehalt des Pressrückstandes nach der 30-minütigen Heißmaische. Die Umkehrung dieses Effektes bei längerer Heiß-Maische-Behandlung könnte durch eine Auflösung der Verkleisterung in Folge eines beginnenden enzymatischen Stärkeabbaus hervorgerufen werden.

Aufgrund der erhöhten Auffaserung der Maissilage im Verlauf der Heißmaische kommt es erneut zu einem erhöhten Eintrag von Trockensubstanz und damit organischer Feststoffe in das Pressat (Abbildung B.5). Dies spiegelt sich auch in den höheren TS- und oTS-Frachten wieder (vgl. Tabelle B.5). Die oTS-Gehalte der Pressate liegen alle bei etwa 93 %.

Die CSB-Konzentrationen und -Frachten bestätigen abermals den Zusammenhang von CSB-Konzentration und TS-Konzentration sowie die Abhängigkeit der Fracht von der Pressatausbeute, auch wenn die Abweichungen der Pressatausbeute über die hier betrachteten Varianten eher gering ausfallen. Beachtenswert ist, dass die am wenigsten intensiv behandelte Variante Sc0000/00-2 die zweithöchste CSB-Konzentration und -Fracht liefert. Abgesehen von dieser Variante führt die Vorbehandlung mittels Heißmaische zu tendenziell höheren CSB-Konzentrationen und -Frachten als die Varianten mit geringeren Maischtemperaturen (Abbildung 6.14).

Die Resultate zum Parameter CSB werden weitestgehend durch die Gasbildungsraten bestätigt. Die Ergebnisse der Gasbildung in Bezug auf 1 Mg TS-Input weisen tendenziell auf eine bessere anaerobe Abbaubarkeit nach einer Maische bei 90 °C hin (Abbildung B.6).

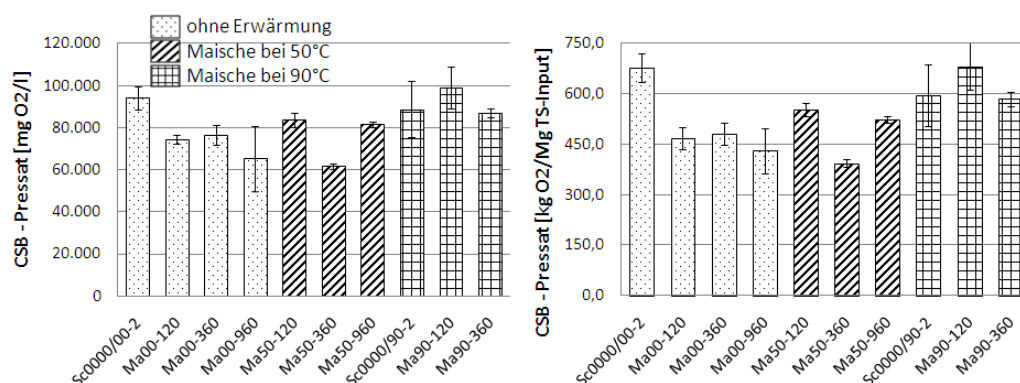


Abbildung 6.14: Einfluss der Intensität der Maisch-Behandlung auf den CSB-Gehalt und die CSB-Fracht des Pressats

6.2.9 Auswirkung der Intensität der Vakuum-Siede-Behandlung und Maischbehandlung auf die Extraktionsleistung - Maissilage

Nachdem in den Kapiteln 6.2.7 und 6.2.8 der Einfluss der alleinigen Vakuum-Siede-Behandlung bzw. Maische dargestellt wurde, wird in diesem Abschnitt die Auswirkung der Kombination beider Prozesse und damit der ursprünglichen Verfahrenskombination (vgl. Kapitel 6.1) auf die Extraktionsleistung behandelt. Hierzu werden Ergebnisse aus zwei Versuchsreihen verglichen (Tabelle 6.10). In der ersten Versuchsreihe weist das Input-Substrat ein Wasser/Silage-Verhältnis von 1/1, in der zweiten Reihe ein Verhältnis von 2/1 auf. Wie bereits im Kapitel 6.2.5 erläutert, waren die Versuche mit der Stempelpresse im Vergleich zu denen mit der Schneckenpresse von größeren Schwierigkeiten hinsichtlich der Versuchsdurchführung und schlechteren Extraktionsleistungen geprägt. Die Ergebnisse der Versuchsvarianten mit Vakuum-Siede-Behandlung und Maische aus der Versuchsreihe mit Einsatz der Stempelpresse bleiben daher unberücksichtigt.

Tabelle 6.10: Versuchsvarianten zur Bestimmung des Einflusses der Intensität der Vakuum-Siede- und Maisch-Behandlung - Maissilage

Versuch	Massenverhältnis	Vakuum-Siede-Behandlung			Maische		Presse
	Wasser/Silage	[mbar]	[°C]	[min]	[°C]	[min]	
Sc-UB	1/1	-	-	-	-	-	Schnecke
Sc5040/00	1/1	50	40	30	-	-	Schnecke
Sc0000/90	1/1	-	-	-	90	30	Schnecke
Sc5090/00	1/1	50	90	30	-	-	Schnecke
Sc5040/90	1/1	50	40	30	90	30	Schnecke
Sc5090/90	1/1	50	90	30	90	30	Schnecke
Sc0000/00-2	2/1	-	-	-	-	30	Schnecke
Sc5090/00-2	2/1	50	90	30	-	30	Schnecke
Sc0000/90-2	2/1	-	-	-	90	30	Schnecke
Sc5040/50-2	2/1	50	40	30	50	30	Schnecke
Sc5090/90-2	2/1	50	90	30	90	30	Schnecke

Die unbehandelte Referenz-Variante in der ersten Versuchsreihe ist SC-UB, die der zweiten Versuchsreihe Sc0000/00-2. Die in den Abbildungen darauf folgenden Varianten nehmen nach rechts in ihrer Behandlungsintensität zu, bis zur einer „Maximalbehandlung“ in Form einer 30-minütigen Vakuum-Siede-Behandlung (50 mbar, 90 °C) und einer anschließenden 30-minütigen Heißmaische. Die Annahme, dass in

der gewählten Reihenfolge eine Zunahme der Behandlungsintensität vorliegt, basiert auf den Ergebnissen der vorherigen Kapitel und den Ergebnissen der beiden dargestellten Versuchsreihen selbst. Diese lassen den Schluss zu, dass eine höhere Behandlungstemperatur einen stärkeren Einfluss auf die Extraktionsleistung hat, als die Vakuum-Behandlung.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die beiden Versuchsreihen mit den unterschiedlichen Prozesswassermassen getrennt voneinander diskutiert.

Die Pressatausbeute verringert sich, sobald in der Behandlung eine Heißmaische integriert ist (Abbildung 6.15). Die geringste Pressatausbeute konnte nach der maximalen Behandlungsvariante (Sc5090/90) erfasst werden. Dieses Ergebnis war bereits in vorherigen Vergleichen aufgefallen. In diesem Vergleich zeigt sich, dass dieser Effekt eventuell auch auf die verschlechterte Abpressbarkeit nach besonders intensiven – insbesondere stark erhitzten – Vorbehandlungsprozessen zurückgeführt werden kann. Die Trockensubstanzgehalte der Pressrückstände zeigen keine klar definierbaren Effekte.

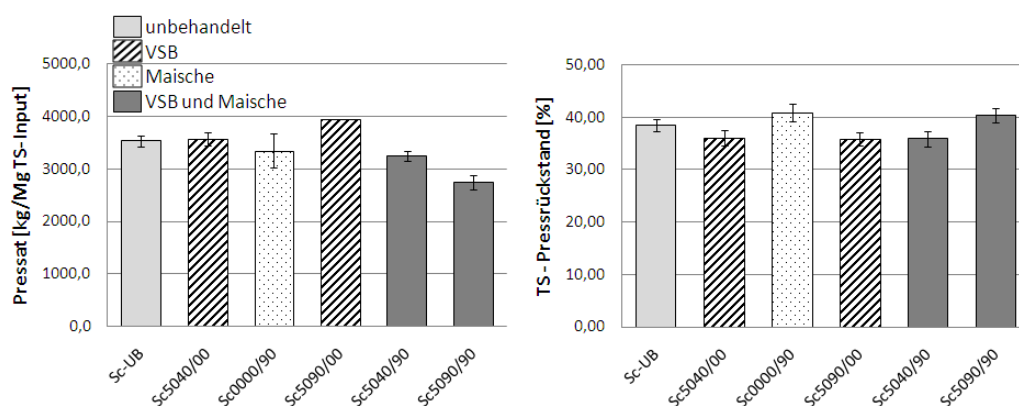


Abbildung 6.15: Einfluss der Intensität der Vakuum-Siede- und Maisch-Behandlung auf die Pressatausbeute und den TS-Gehalt des Pressrückstandes - Wasser/Silage: 1/1

Die TS-Konzentrationen in den Pressaten der Varianten mit alleiniger Vakuum-Siede-Behandlung liegen relativ betrachtet um etwa 25 % unter denen der übrigen Varianten (Abbildung 6.16). Vermutlich ist dies auf die geringere mechanische Beanspruchung unter zusätzlicher Wärmeeinwirkung zurückzuführen. Die intensiver behandelten Substrate aus der Maischvariante und den beiden kombinierten Varianten faserten im Verlauf der Vorbehandlung makroskopisch erkennbar deutlich auf, was zu einer höheren Überführung partikulärer Stoffe in das Pressat führte und somit

ursächlich für den höheren TS-Gehalt ist. Überraschend und unerklärlich hoch ist der Trockensubstanzgehalt in den Pressaten, die ohne vorherige Vorbehandlung gewonnen wurden (Sc-UB).

Die oTS-Konzentrationen liegen allesamt auf einem ähnlichen Niveau.

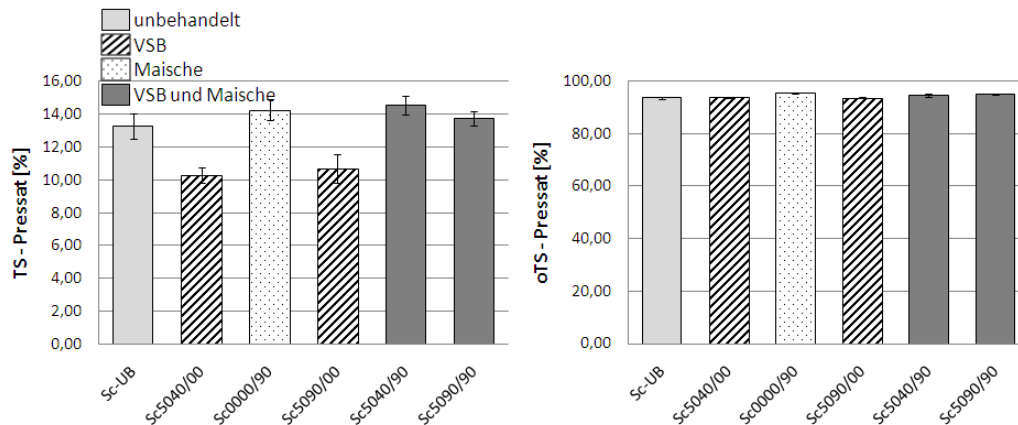


Abbildung 6.16: Einfluss der Intensität der Vakuum-Siede- und Maisch-Behandlung auf den TS- und oTS-Gehalt des Pressats - Wasser/Silage: 1/1

Die CSB-Konzentrationen steigen mit zunehmender Behandlungsintensität an (Abbildung 6.17). Der höheren mittleren TS-Konzentration des Pressats nach Heißmaische (Sc0000/90) folgend, liegt auch der mittlere CSB-Gehalt über denen der vakuum-siede-behandelten Varianten. Liegt die mittlere TS-Konzentration der Variante Sc0000/90 jedoch noch 25 %(rel.) über dem TS-Gehalt der Variante Sc5090/00, ist die CSB-Konzentration lediglich etwa 9 %(rel.) höher. Dies deutet auf eine erhöhte Überführung gelöster CSB-wirksamer Organik durch die Vakuum-Siede-Behandlung hin. Dieser Effekt ist auch beim Vergleich der beiden kombinierten Varianten mit der alleinigen Heißmaischebehandlung erkennbar (Sc5040/90 und Sc5090/90).

Die TS-Gehalte der Pressate sind nahezu gleich hoch. Die CSB-Konzentrationen in den zusätzlich vakuum-siede-behandelten Varianten fällt jedoch um etwa 17 %(rel.) höher aus. Im Vergleich der unbehandelten Variante mit den behandelten Varianten ist dieser Zusammenhang ebenfalls deutlich erkennbar. Trotz vergleichsweise hoher TS-Konzentrationen liefern die unbehandelten Substrate die niedrigsten CSB-Konzentrationen. Alle Behandlungsvarianten mit einem Vakuum- und/oder Wärmeeinfluss führen demnach anscheinend zu einer Zunahme gelöster CSB-wirksamer Stoffe. Die CSB-Frachten zeigen, überlagert durch die Pressatausbeuten, einen ähnlichen Verlauf.

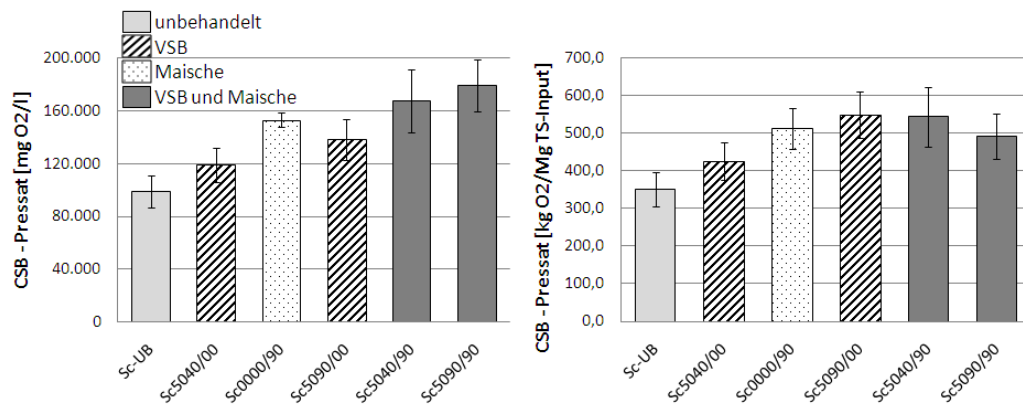


Abbildung 6.17: Einfluss der Intensität der Vakuum-Siede- und Maisch-Behandlung auf den CSB-Gehalt und die CSB-Fracht des Pressats - Wasser/Silage: 1/1

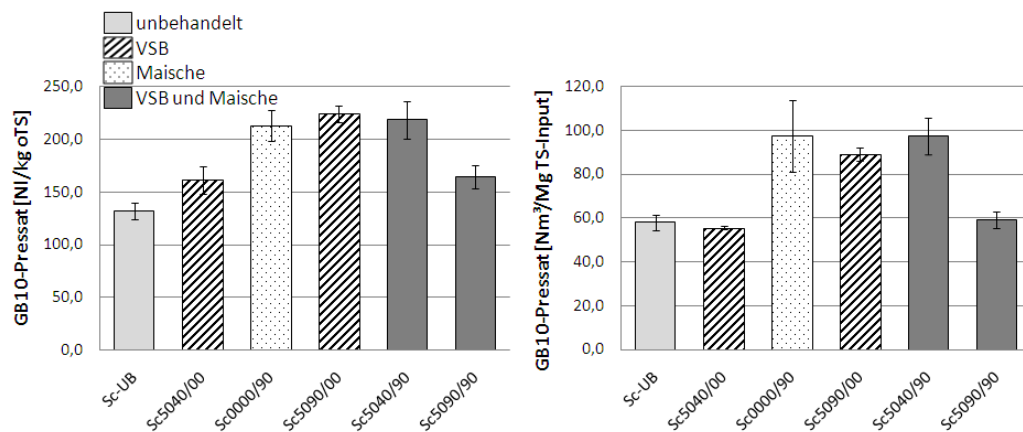


Abbildung 6.18: Einfluss der Intensität der Vakuum-Siede- und Maisch-Behandlung auf die Gasausbeute aus dem Pressat - Wasser/Silage: 1/1

Die Gasbildungsrate in [NI/kg oTS] weisen auf die gleichen Auswirkungen der Vorbehandlungsverfahren hin, wie die CSB-Werte (Abbildung 6.18). Die geringe Gasbildungsrate der Variante Sc5090/90 wurde bereits im Kapitel 6.2.5 erörtert.

Die Ergebnisse der Versuchsvarianten mit doppelter Wasserzugabe sind in den Abbildungen B.7 bis B.10 dargestellt. Wie bereits im Kapitel 6.2.6 erläutert, führt die erhöhte Wassermasse zu höheren CSB-Frachten und damit auch zu höheren Gasbildungsrate pro Mg TS-Input, als dies für vergleichbare Varianten mit einem Wasser/Silage-Verhältnis von 1/1 der Fall ist. Ein signifikanter Einfluss der Intensität der Vorbehandlungsparameter Unterdruck, Temperatur und Maische ist in den

Ergebnissen, bis auf eine verringerte Pressatausbeute der intensiv behandelten Varianten (Sc0000/90-2, Sc5040/50-2 und Sc5090/90-2), nicht erkennbar.

6.2.10 Varianzanalysen ausgewählter Versuchsergebnisse - Maissilage

Aufgrund der Vielzahl von Versuchsvarianten und erfassten Parametern, beschränken sich die durchgeführten Varianzanalysen (vgl. Kapitel 5.5.4, Seite 104) auf folgende wesentliche Fragestellungen:

- Weichen die nach einer Vakuum-Siede-Behandlung erreichten Extraktionsleistungen signifikant von denen ohne zusätzliche Vorbehandlung ab (Sc5090/00:Sc-UB)?
- Weichen die nach einer Vakuum-Siede-Behandlung erreichten Extraktionsleistungen signifikant von denen nach einer Heißmaische ab (Sc5090/00:Sc0000/90)?
- Weichen die nach einer Vakuum-Siede-Behandlung mit anschließender Heißmaische erreichten Extraktionsleistungen signifikant von denen nach einer alleinigen Heißmaische ab (Sc5090/90:Sc0000/90)?

In Folge der genannten Unsicherheiten bezüglich der Gasbildungsraten (vgl. Kapitel 6.2.5) beschränkt sich die Varianzanalyse auf den Parameter CSB (CSB-Konzentration [mg O_2 /l], CSB-Fracht [kg O_2 /Mg Silage-TS], CSB-Extraktion in Bezug auf das Ausgangssubstrat [%]).

Tabelle 6.11: Werte der Testgröße F der einfaktoriellen ANOVA - CSB-Werte, ausgewählter Varianten

Verglichene Varianten	CSB-Konz. F	CSB-Fracht F	CSB-Extr. F
Sc5090/00 Sc-UB	12,03	20,45	20,45
Sc5090/00 Sc0000/90	2,28	0,59	0,59
Sc5090/90 Sc0000/90	4,81	0,19	0,19

Die Varianzanalysen zeigen, dass die Werte der Testgröße für die beiden Varianten Sc5090/00 und SC-UB über dem kritischen Wert des F-Quantils 7,71 liegen

und somit die CSB-Werte der Vakuum-Siede-behandelten Variante signifikant über denen der unbehandelten Variante liegen. Die beiden anderen verglichenen Varianten-Paarungen weisen aufgrund des geringen F-Quantils jedoch keine signifikanten Unterschiede für das gewählte Signifikanzniveau (5 %) auf. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass eine Behandlung mit erhöhten Temperaturen durchaus höhere Extraktionsleistungen bedingt, die zusätzliche Vakuum-Siede-Behandlung jedoch keine signifikanten Einflüsse hat.

6.2.11 Energieverbrauch - Maissilage

Der Vergleich der Extraktionsleistung in Bezug auf das Ausgangssubstrat (vgl. Kapitel 6.2.4) und die Varianzanalyse (vgl. Kapitel 6.2.10) zeigen, dass eine Vakuum-Siede-Behandlung mit anschließender Heißmaische im Vergleich zu einer einfachen Heißmaische keine signifikanten Vorteile erbringt. Der für eine Vakuum-Siede-Behandlung zusätzlich aufzubringende Aufwand ist demnach nach energetischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht sinnvoll. Der Vollständigkeit halber sei dennoch der für das Verfahren notwendige Energieaufwand in knapper Form dargestellt.

Die Ergebnisse beziehen sich stets auf ein behandeltes Ausgangssubstrat von 40 kg FS Maissilage.

Die Erfassung des Energieverbrauchs der gesamten Vakuum-Siede-Behandlung unter Einbeziehung der Maische und der Fest-Flüssig-Trennung erfolgte über die Aufsummierung des Energieverbrauchs folgender Einheiten:

- Vakuum-Siede-Behandlung:
 - Wärmeenergie,
 - Vakuumpumpe,
 - Antrieb Schneckenförderer,
 - Kälteaggregat Kondensator,
- Maisch-Behandlung:
 - Wärmeenergie,
 - Antrieb Doppelwellenmischer,
- Schneckenpresse.

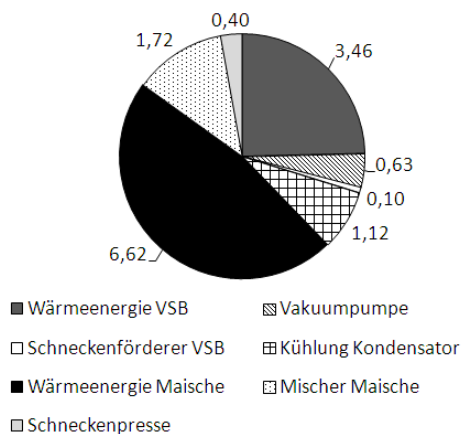
In der Abbildung 6.19 sind die Energieverbräuche zweier Verfahrensvarianten der Vakuum-Siede-Behandlung wiedergegeben. Der Unterschied zwischen den energetischen Aufwendungen der Variante mit Vakuum-Siede-Behandlung mit anschließender Maische (Sc5090/90) und ohne Maische (Sc5090/00) macht deutlich, dass der

mit Abstand größte Teil der Prozessenergie auf die Maische entfällt. Dieser Anteil ist zudem dominiert von der Wärmeenergie für die hier ausgewiesene Heißmaische. Erwartungsgemäß ist der energetische Aufwand der Maische abhängig von dem eingesetzten Wasser/Silage-Verhältnis und der gewählten Behandlungstemperatur (Abbildung B.20).

Die erfassten Energieverbräuche der labortechnischen Versuche zeigen, dass der größte Anteil der aufzuwendenden Energie für die betrachteten Vorbehandlungsvarianten Wärmeenergie ist. Lediglich 30 % der Energie einer Vakuum-Siede-Behandlung ohne anschließende Maische entfallen auf die Vakuum-Behandlung (elektrische Energie für Vakuumpumpe und Kondensator für die Brüden). Für eine Vakuum-Siede-Behandlung mit Heißmaische liegt dieser Anteil bei 12 %. Die Versuchsergebnisse lassen jedoch nicht den Schluss zu, dass die Vakuum-Siede-Behandlung eine Wirkung erzielen kann, die zusätzliche Energiegewinne in mindestens dieser Größenordnung über einen Mehrertrag an Biogas ermöglicht.

Auffällig ist der große Unterschied der benötigten Wärmeenergie für die Vakuum-Siede-Behandlung und die Maische bei gleicher Prozessdauer. Diese Differenz ist im Wesentlichen auf eine schlechtere Isolation des Maischaggregats zurückzuführen. Durch eine optimierte Wärmedämmung könnte hier ein beträchtliches Maß an Wärmeenergie eingespart werden.

Sc5090/90 - Energieaufwand: 14,04 kWh



Sc5090/00 - Energieaufwand: 5,7 kWh

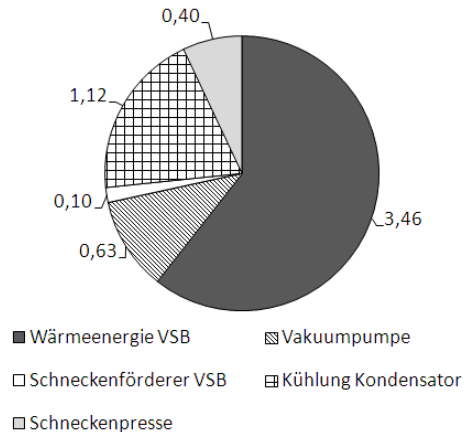


Abbildung 6.19: Energieverbrauch der Versuchsvarianten Sc5090/90 und Sc5090/00 [kWh]

Die Aufteilung der eingesetzten Energie für das vollständige Verfahren (Vakuum-Siede-Behandlung und Heißmaische) in 70 % thermische und 30 % elektrische Ener-

gie entspricht der optimierten Energiebilanz für das großtechnische Verfahren (vgl. Tabelle 6.4).

Der Energieverbrauch der labortechnischen Anlage zur Vakuum-Siede-Behandlung und Maische konnte mittels der hierfür in die Anlagensteuerung integrierten Messmimik erfasst werden. Da für einen Großteil der Versuche die Schneckenpresse Verwendung fand und ein Einsatz eines derartigen Aggregats für eine großtechnische Anwendung deutlich wahrscheinlicher als der Einsatz einer Stempelpresse ist, wurden für den Prozessschritt Fest-Flüssig-Trennung der Energieverbrauch der Schneckenpresse herangezogen. Nach Rücksprache mit dem Hersteller ist für die gewählte Betriebsweise und das verwendete Substrat von einer 70 %igen Energieaufnahme des 11 kW Motors auszugehen [Kufferath, 2006]. Für den etwa dreiminütigen Pressbetrieb zur Verarbeitung einer Versuchscharge wird daher ein Energieverbrauch von 0,4 kWh angesetzt.

Die Energieverbräuche der halbtechnischen Versuche sind nicht ohne weiteres auf eine großtechnische Anwendung zu übertragen. Einsparpotenziale, die sich üblicherweise bei der Verwendung größerer Aggregate ergeben, wurden nicht berücksichtigt.

6.2.12 Ausgangssubstrat - Bioabfall

Die Konzentrationswerte der Input-Analysen und Gasbildungsraten der Ausgangssubstrate für die Bioabfälle sind in der Tabelle 6.12 angegeben. Die sich hieraus ergebenden Frachten sind in der Tabelle B.2 aufgeführt.

Tabelle 6.12: Konzentrationen und Gasbildungsraten der Input-Substrat-Chargen - Bioabfälle

Substrat	TS [%]	TS [%]	oTS [%]	oTS [%]
Charge	MW	STABW	MW	STABW
WA	34,62	1,06	67,64	0,50
BS	31,26	1,01	75,83	0,23
CSB [mg O ₂ /g TS]		GB10 [Nl/kg oTS]		
	MW	STABW	MW	STABW
WA	809,2	82,2	253,4	97,3
BS	888,1	140,5	290,2	42,4

Aufgrund der nur geringen Anzahl von Versuchsvarianten mit einem einheitlichen Ausgangssubstrat ($n = 4$) ist die Ermittlung einer Regressionsgerade der Daten, wie

für die Versuchsvarianten mit Maissilage (vgl. Kapitel 6.2.3), nicht sinnvoll. Auch aufgrund der größeren Inhomogenität des Substrates Bioabfall haben die Versuchsergebnisse lediglich orientierenden Charakter (vgl. Kapitel 5.3.6).

Die Daten der Versuchsergebnisse in Substratmassen, Konzentrationen und Frachten sind im Anhang enthalten (Tabelle B.7 bis B.9).

6.2.13 Extraktionsleistung der Versuchsvarianten - Bioabfall

Aus den Konzentrations- und Frachtangaben ergeben sich die nach den jeweiligen Versuchsvarianten erzielten anteilig extrahierten organischen Inhaltsstoffe als prozentualer Wert des oTS, CSB und GB_{10} der Ausgangssubstrate (Abbildung 6.20 und Tabelle B.11).

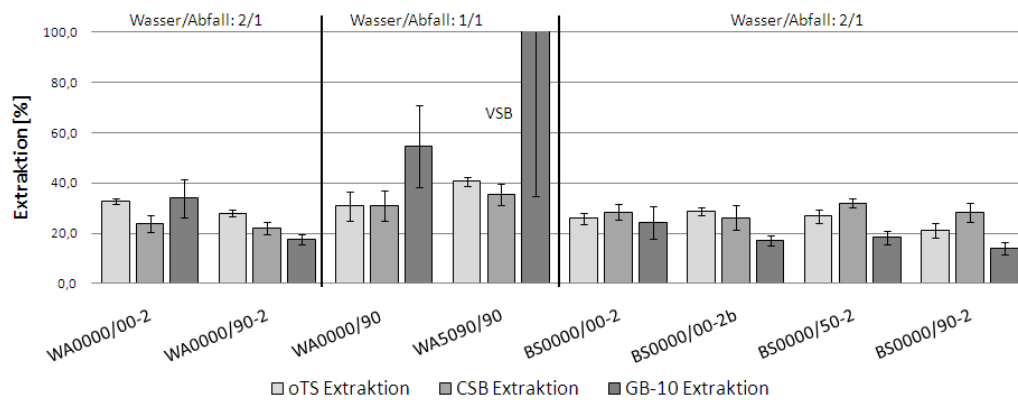


Abbildung 6.20: Anteilige Extraktion organischer Inhaltsstoffe aus dem Ausgangssubstrat in das Pressat - Bioabfall

Die aufgetragenen Extraktionsleistungen deuten – im Gegenteil zu den mit Maissilage erzielten Extraktionsleistungen – nicht auf einen positiven Einfluss erhöhter Prozesswassermassen hin. Die Werte zur oTS- und CSB-Extraktion der unter Vakuum-Siede-Bedingungen vorbehandelten Substrate (WA5090/90) fallen im Vergleich zu den übrigen Varianten leicht erhöht aus.

Bezüglich der Versuchsvarianten mit einem Wasser/Substrat-Verhältnis von 2/1 sind die Extraktionsleistungen der mit den Summenparametern oTS und CSB erfassten Stoffe nach Vakuum-Siede-Behandlung signifikant höher. Der Unterschied zwischen den beiden Varianten mit einem Wasser/Substrat-Verhältnis 1/1 ist nicht signifikant.

Es ist davon auszugehen, dass die höheren Extraktionsleistungen der vakuum-siede-behandelten Variante im Vergleich zu den Varianten mit einem höheren Pro-

zesswasseranteil auf das offenbar nicht optimale Wasser/Substrat-Verhältnis von 2/1 zurückgeführt werden können und keine unmittelbare Folge der Vakuum-Siede-Behandlung sind (vgl. Abbildung B.13).

Die Angaben zum Parameter GB₁₀ weisen hohe Standardabweichungen auf und liefern keine belastbaren Analysewerte bzw. Extraktionsleistungen (vgl. Abbildung B.14).

Die analog zu den Ergebnisauswertungen der Maissilageversuche erstellten Vergleiche der Analysewerte lassen auf keine weiteren deutlichen Unterschiede der untersuchten Behandlungsvarianten schließen (vgl. Abbildung B.11 bis B.14).

6.2.14 Zusatzversuche mit Pressaten - Maissilage und Bioabfall

Zusatzversuche Pressate - Maissilage

Die Versuchsergebnisse der halbtechnischen Reihenuntersuchungen weisen darauf hin, dass es aufgrund der Vorbehandlung mittels Vakuum-Siede-Extraktion zu einer erhöhten Extraktion gelöster CSB-wirksamer Komponenten kommt (vgl. Kapitel 6.2.9). Mittels Sedimentationsversuchen sollte der Anteil absetzbarer Stoffe verdeutlicht werden.

Nach zweitägiger Ruhephase war in intensiver behandelten Pressaten (Heißmaische, Vakuum-Siede-Behandlung mit Heißmaische) ein visuell deutlich erhöhter volumetrischer Anteil in Suspension befindlicher Stoffe als im Pressat nach Kaltmaische zu beobachten (Abbildung 6.21). Aufgrund der stofflichen Zusammensetzung der Maissilage war zu erwarten, dass Stärke einen Großteil der gelösten und suspendierten Organik ausmacht. Die leicht abbaubare Stärke kann durch eine komplexbildende Färbelösung (Lugol'sche Lösung) nachgewiesen werden. Die Färbelösung lagert sich an das Grundgerüst des Polysaccharids Stärke an und bildet einen dunkelblau gefärbten Komplex.

In allen drei Pressaten weist der Farbumschlag deutlich auf Stärke als Hauptbestandteil der suspendierten und abgesetzten Stoffe hin. Die in Abbildung 6.21 dunkel gefärbten Bereiche der drei Teströhrchen hatten eine blaue Färbung angenommen. Aufgrund des nicht blau verfärbten Flüssigkeitsüberstandes kann gelöste Stärke in nennenswerten Anteilen ausgeschlossen werden. Da Stärke anaerob gut abbaubar ist, ist von einem erheblichen Anteil dieser organischen Verbindung an der Biogasbildung auszugehen.

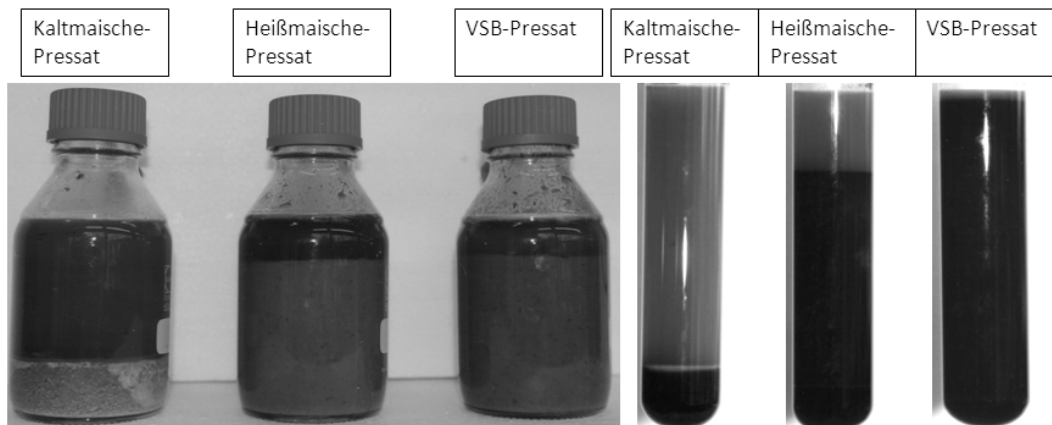


Abbildung 6.21: Absetzversuch (links) und Stärkenachweis (rechts) von Maissilagepressaten (Wasser/Silage: 1/1)

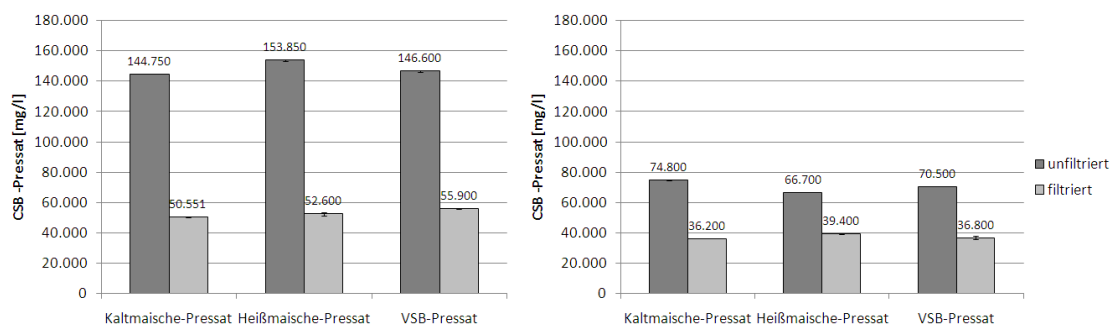


Abbildung 6.22: CSB-Konzentrationen der Silage-Pressate nach unterschiedlich intensiver Vorbehandlung - filtriert und unfiltriert (links Wasser/Silage: 1/1, rechts 2/1)

Der gelöste CSB ist in Abbildung 6.22 als CSB-Konzentration der filtrierten Proben angegeben. Die Konzentration im filtrierten Pressat beträgt für die Versuchsvarianten mit einem Wasser/Silage-Verhältnis von 1/1 etwa 35 % der Konzentration des Gesamtpressats (VSB: leicht erhöht 38 %). Der gelöste Anteil erhöht sich in den Pressaten mit doppelter Prozesswasserzugabe für die wärmebehandelten Varianten (Heißmaische und VSB) auf über 50 % und liegt für die Kaltmaische-Ergebnisse nur knapp darunter.

Diese Werte belegen, dass ein erheblicher Teil der in die Flüssigphase überführten Organik in ungelöster, suspendierter Form vorliegt. Die Annahme, dass nach der Vakuum-Siede-Behandlung eine verbesserte Überführung der Organik in einen

gelösten Anteil möglich ist, bestätigt sich daher nicht (vgl. Kapitel 6.2.9).

Die vergleichende Betrachtung der CSB-Werte der Gesamtpressate beider Wasser/-Silage-Verhältnisse widerspricht den in Kapitel 6.2.6 präsentierten Ergebnissen, die keine reine Verdünnung, sondern eine relative Zunahme der CSB-Extraktion bei zusätzlicher Prozesswasserzugabe ausweisen.

Bemerkenswert ist weiterhin, dass der volumetrisch deutlich geringer erscheinende Anteil absetzbarer Stoffe im Pressat der Kaltmaischebehandlung nicht zu deutlich verringerten CSB-Konzentrationen im Gesamtpressat führt. Die Feststoffpartikel liegen in den beiden intensiver vorbehandelten Pressaten demnach als Folge der stärkeren Auffaserung lediglich in stärker dispergierter Form vor. Inwieweit sich dieser Effekt auf die Vergärbarkeit der Pressate auswirkt, war eine der Fragestellungen für zusätzliche Kurzgärversuche.

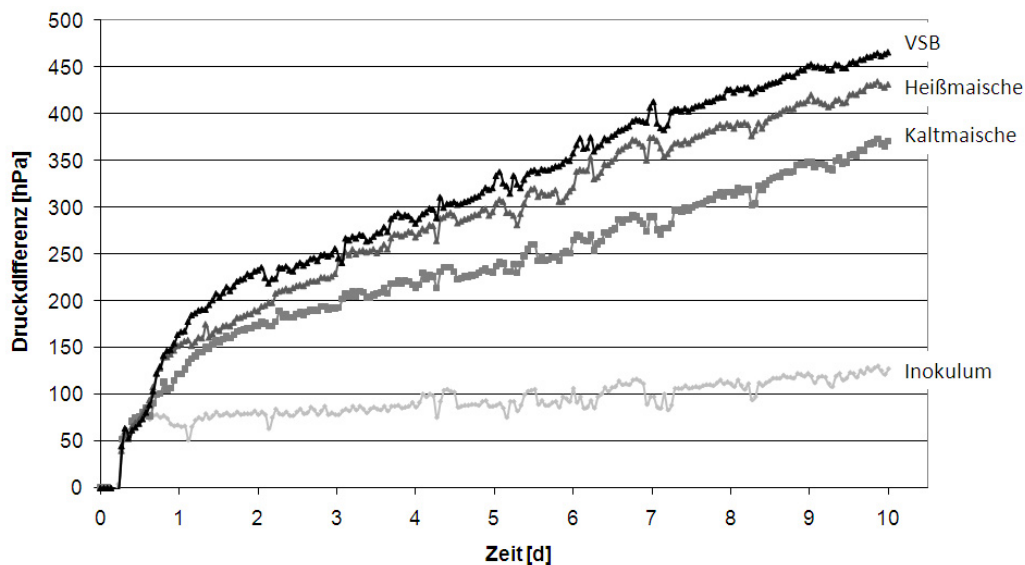


Abbildung 6.23: Gasbildungsaktivität der unfiltrierten Silage-Pressate nach unterschiedlich intensiver Vorbehandlung (Wasser/Silage: 1/1)

Die Gasbildungsaktivität der unfiltrierten Pressate im Kurzgärttest ist nach der Vakuum-Siede-Behandlung (466 hPa) gegenüber der Kaltmaischebehandlung (371 hPa) um 26 % erhöht (Abbildung 6.23). Die Aktivität des mittels Heißmaische vorbehandelten Pressats (431 hPa) weist eine um 16 % erhöhte Aktivität auf. Der Unterschied zwischen den beiden intensiv behandelten Varianten fällt hingegen deutlich geringer aus.

Ob die leicht erhöhte Aktivität des vakuum-siede-behandelten Pressats tatsächlich auf die Vakuum-Behandlung oder auf die längere Wärmebehandlung zurückzuführen ist, kann nicht mit Sicherheit beurteilt werden.

Die Gasbildungsaktivitäten der filtrierten Pressate zeigten eine deutlich verringerte Aktivität im Vergleich zu den unfiltrierten Pressaten und weisen nicht auf einen Zusammenhang mit der Art der Vorbehandlung hin (Abbildung B.15). Demnach ist als entscheidender Einfluss auf eine erhöhte Gasbildungsaktivität der vorbehandelten Pressate – zumindest für das Substrat Maissilage – die Überführung möglichst gut dispergierter Feststoffe in die Flüssigphase auszumachen.

Die Gärversuche mit der vorbehandelten Silage im Wasser/Silage-Verhältnis 2/1 zeigen keine deutlichen Abweichungen hinsichtlich der Gasbildungsaktivitäten (Abbildung B.16). Möglicherweise werden die Auswirkungen, die in den Versuchen mit geringerer Prozesswasserzugabe erkennbar sind, durch das größere Extraktionsvolumen reduziert, sodass keine Korrelation mit den Vorbehandlungsverfahren mehr nachweisbar ist.

Zusatzversuche Pressate - Bioabfall

Die CSB-Konzentrationen der Bioabfall-Pressate lassen keinen Einfluss des Vorbehandlungsverfahrens erkennen. Es wird jedoch analog zu den Maissilage-Pressaten belegt, dass in den Pressaten ein großer Anteil des Gesamt-CSB auf die suspendierten Feststoffe zurückzuführen ist ($> 50\%$). Dieser liefert für die Gasbildung in der Vergärung einen entscheidenden Beitrag. Verglichen mit dem Maissilage-Pressat mit doppelter Prozesswassermasse weisen die Bioabfall-Pressate geringere CSB-Konzentrationen auf (Abbildungen B.17).

Aus den Gasbildungsversuchen lässt sich ebenfalls kein gesicherter Zusammenhang zu den unterschiedlichen Vorbehandlungsverfahren ableiten (Abbildung B.19).

6.2.15 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse der halbtechnischen Versuche weisen auf einen Zusammenhang der Art der Vorbehandlung mit der extrahierbaren organischen Fracht hin. Intensiv vorbehandelte Substrate erbrachten im Allgemeinen nach der Abpressung höhere Konzentrationen organischer Komponenten und damit bessere Extraktionsleistungen als vergleichbare Varianten mit weniger intensiver Vorbehandlung. Die erhöhten CSB-Werte in den Pressaten sind jedoch im Wesentlichen durch eine erhöhte Überführung organischer Feststoffe (oTS-Fracht) in das Pressat bedingt. Die Korrelation einer erhöhten CSB-Fracht mit einer erhöhten Intensität der Vorbehandlung scheint – wenn

überhaupt – nur bedingt durch die Vakuum-Siede-Behandlung beeinflussbar zu sein. Der im Kapitel 6.2.7 erkennbare Anstieg der CSB-Extraktion und der Gasbildungsrate in den Gärversuchen mit der Intensität der Vakuum-Siede-Behandlung ist offenbar maßgeblich auf die zunehmende Intensität und Dauer der Wärmebehandlung und der eingetragenen mechanischen Energie zurückzuführen (vgl. Kapitel 6.2.9).

Eine erhöhte Überführung gelöster CSB-wirksamer Komponenten in die Flüssigphase aufgrund einer vorherigen Vakuum-Siede-Behandlung ist indirekt in den Ergebnissen der Reihenuntersuchungen erkennbar (vgl. Kapitel 6.2.9). Die später durchgeführten Zusatzversuche belegen diesen Zusammenhang jedoch nicht (vgl. Kapitel 6.2.14).

Es konnte nachgewiesen werden, dass ein erheblicher Anteil des CSB auf suspendierte Feststoffe zurückzuführen ist. Dies ist bei der Wahl der Fest-Flüssig-Trennung eines Vorbehandlungsverfahrens vor Nassvergärungsverfahren von Bedeutung. Wird die Leistungsfähigkeit eines hierfür eingesetzten Aggregats (im vorliegenden Fall der Presse) nach der Auftrennung einer möglichst feststoffarmen Flüssigphase und einem möglichst gut entwässerten Pressrückstand beurteilt, würde dies bedeuten, dass eine Verbesserung der Phasentrennung (bzw. Presseleistung) eine Reduktion der organischen Fracht im Pressat und damit eine Reduktion des Biogasertrages zur Folge hätte. Dies ist insbesondere bei erhöhten Anforderungen an den Zulauf zu Hochleistungsfermentern (z.B. Typ UASB) zu berücksichtigen.

Im Literaturteil dieser Arbeit wurden Effekte einer Zu- und Abnahme des Kristallisationsgrades cellulosehaltiger Substrate hinsichtlich hydrolytischer Vorgänge benannt, die im Verlauf von Quellvorgängen mit Wasser beobachtet wurden (vgl. Kapitel 3.2.2). Ein eindeutiger Zusammenhang ist in der Literatur jedoch umstritten (vgl. Taherzadeh und Karimi [2008]). Dem Einfluss der externen und internen Oberfläche organischer Substanzen, die einem enzymatischen Abbau zur Verfügung stehen, wird in der Literatur ein maßgeblicher Einfluss auf die Abbaubarkeit beigemessen. Wyman [1996] verweist auf diverse Studien, die einen deutlichen Zusammenhang nachweisen. Insbesondere die internen Oberflächen können durch Quellvorgänge mit Wasser extrem vergrößert werden.

Nach den vorliegenden Ergebnissen ist anzunehmen, dass die aus den Versuchsergebnissen abgeleiteten positiven Effekte der untersuchten Vorbehandlungsverfahren eher auf derartige Quellvorgänge, die mechanische Beanspruchung im Verlauf der Fest-Flüssig-Trennung und eventuell die Wärmebehandlung zurückzuführen sind.

Wesentliche positive Effekte der Vakuum-Siede-Behandlung auf die Überführbarkeit leicht abbaubarer organischer Komponenten in eine Flüssigphase oder ein deutlich verbesserter Aufschluss ansonsten anaerob schwer zugänglicher Organik sind aus den Ergebnissen der halbtechnischen Reihenuntersuchungen nicht abzuleiten. Es bleibt zu klären, ob eine Behandlung unter Vakuum und Wärme dennoch eine – möglicherweise geringfügige – Verbesserung der anaeroben Verfügbarkeit zu erbringen vermag, die in einer anderen Verfahrenskombination sinnvoll einsetzbar sein könnte.

Aufgrund der – wenn überhaupt vorhandenen – geringen Wirksamkeit einer Vakuum-Siede-Behandlung, einer möglichen Überlagerung von Effekten durch den Einfluss des Pressaggregats und der Prozesswasserzugabe sowie nicht auszuschließender Ungenauigkeiten durch die Versuchsdurchführung (mehrfaches Umfüllen des Versuchssubstrates im Prozessverlauf) kann eine hinreichend abgesicherte abschließende Aussage zur Wirksamkeit der Vakuum-Siede-Behandlung mittels des halbtechnischen Versuchsaufbaus nicht getroffen werden.

Unter Ausschluss überlagernder Effekte und unter gut kontrollierbaren Versuchsbedingungen erschien eine Versuchsdurchführung im Labormaßstab daher als zielführend (vgl. Kapitel 5.4 und 6.3).

6.3 Versuchsergebnisse labortechnische Versuche

6.3.1 Allgemeine Angaben

Im Vordergrund der labortechnischen Versuche stand erneut die Untersuchung der Einflüsse der Vakuum-Siede-Behandlung auf die Vergärbarkeit organischer Substrate. Hierbei sollte insbesondere die Sinnhaftigkeit der Behandlung bei anliegendem Unterdruck und gleichzeitiger Temperatureinwirkung eingehend und unter Ausschluss überlagernder Effekte betrachtet werden. Zusätzlich wurde der Abbau der Organik in den unbehandelten und behandelten Gärversuchen über die Parameter oTS, TOC und CSB erfasst, um mögliche behandlungsbedingte Effekte nachzuweisen. Die Untersuchung des Einflusses der Vorbehandlung auf die Extraktion gelöster organischer Komponenten erfolgte in zusätzlichen Eluirversuchen.

Zur besseren Einordnung der Ergebnisse und aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Eingangsanalysen der Versuchssubstrate in den Ergebnisteil integriert.

Weitergehende detaillierte Ergebnistabellen und Abbildungen sind im Anhang C aufgeführt. Diese sind in den Verweisen mit einem C gekennzeichnet.

Ein Teil der durchgeführten Versuche wurde in im Rahmen einer Diplomarbeit vergeben [Irakin, 2009]. Die hier gewonnenen Daten sind in die Ergebnisauswertung eingeflossen.

6.3.2 Ausgangssubstrate

Die Wertebereiche der TS, oTS und TOC-Gehalte sowie der CSB-Konzentrationen der Ausgangssubstrate sind in der Tabelle 6.13 zusammengefasst.

Die Mittelwerte und Standardabweichungen der analysierten Parameter für die einzelnen Substrate und Versuchsvarianten sind im Anhang C.2 in den Tabellen C.1 bis C.3 wiedergegeben.

Die biochemischen Stoffgruppen der verwendeten Substrate sind in der Abbildung 6.24 wiedergegeben (vgl. Tabellen C.4 und C.5). Die Werte für das Mischsubstrat aus Stroh und Weizenkörnern wurde anhand von Literaturangaben errechnet [DLG, 1997].

In der Abbildung 6.25 sind die Mittelwerte der Substrateinwaagen aller Ausgangssubstrate als Tortendiagramm dargestellt (vgl. Tabellen C.6 und C.7).

Tabelle 6.13: Wertebereiche der Summenparameter der Versuchssubstrate; angegeben sind jeweils die minimalen und maximalen Mittelwerte der Versuchsreihen. Weizenstroh und -korn nur eine Versuchsreihe

	Mittelwert TS-Gehalt [%]	Mittelwert oTS-Gehalt [%]	Mittelwert TOC-Gehalt [%]	Mittelwert CSB-Konz. [mg O ₂ /g TS]
Kohl	6,09 - 9,85	88,82 - 92,08	38,5 - 41,1	688 - 1.418
Karotte	7,33 - 10,8	87,09 - 92,25	39,2 - 42,9	784 - 1.684
Kartoffel	16,38 - 21,58	90,75 - 95,84	35,9 - 39,4	864 - 1.147
Apfel	9,02 - 15,04	94,43 - 97,74	46,5 - 47,9	1.006 - 1.564
Heu	76,36 - 93,08	92,62 - 94,18	35,7 - 40,1	723 - 1.146
Biertreber	16,28 - 22,84	89,64 - 95,93	35,1 - 39,3	1.143 - 1.535
Obsttrester	10,23 - 13,70	94,06 - 97,71	36,2 - 44,4	1.194 - 2.116
	Mittelwert TS-Gehalt [%]	Mittelwert oTS-Gehalt [%]	Mittelwert TOC-Gehalt [%]	Mittelwert CSB-Konz. [mg O ₂ /g TS]
Weizenstroh	87,6	95,73	33,9	1.208
Weizenkorn	88,65	86,7	39	719

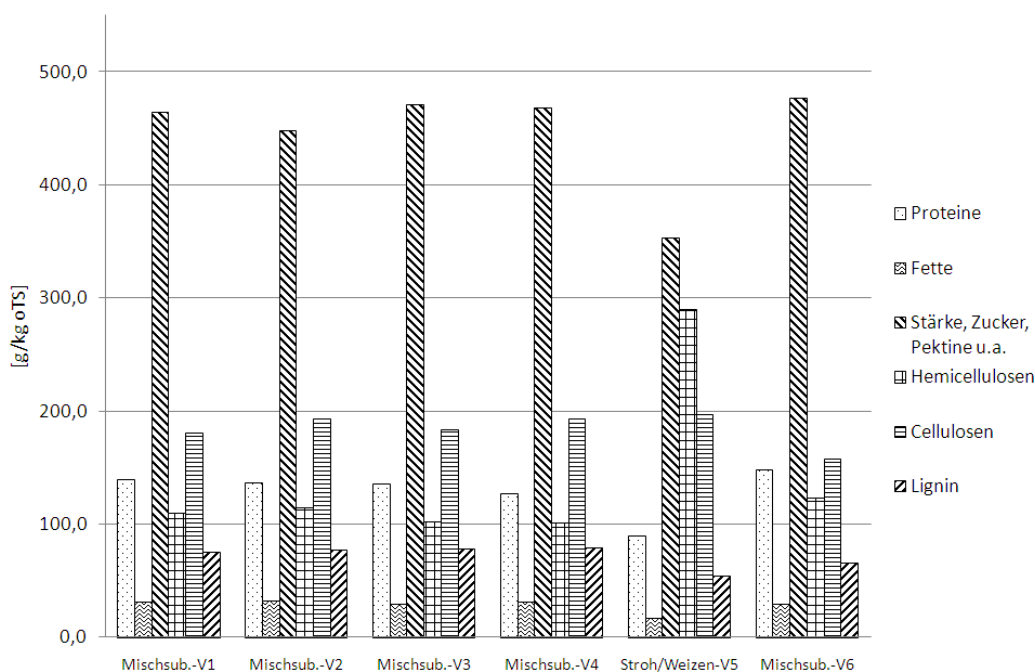


Abbildung 6.24: Biochemische Zusammensetzung der Ausgangssubstrate

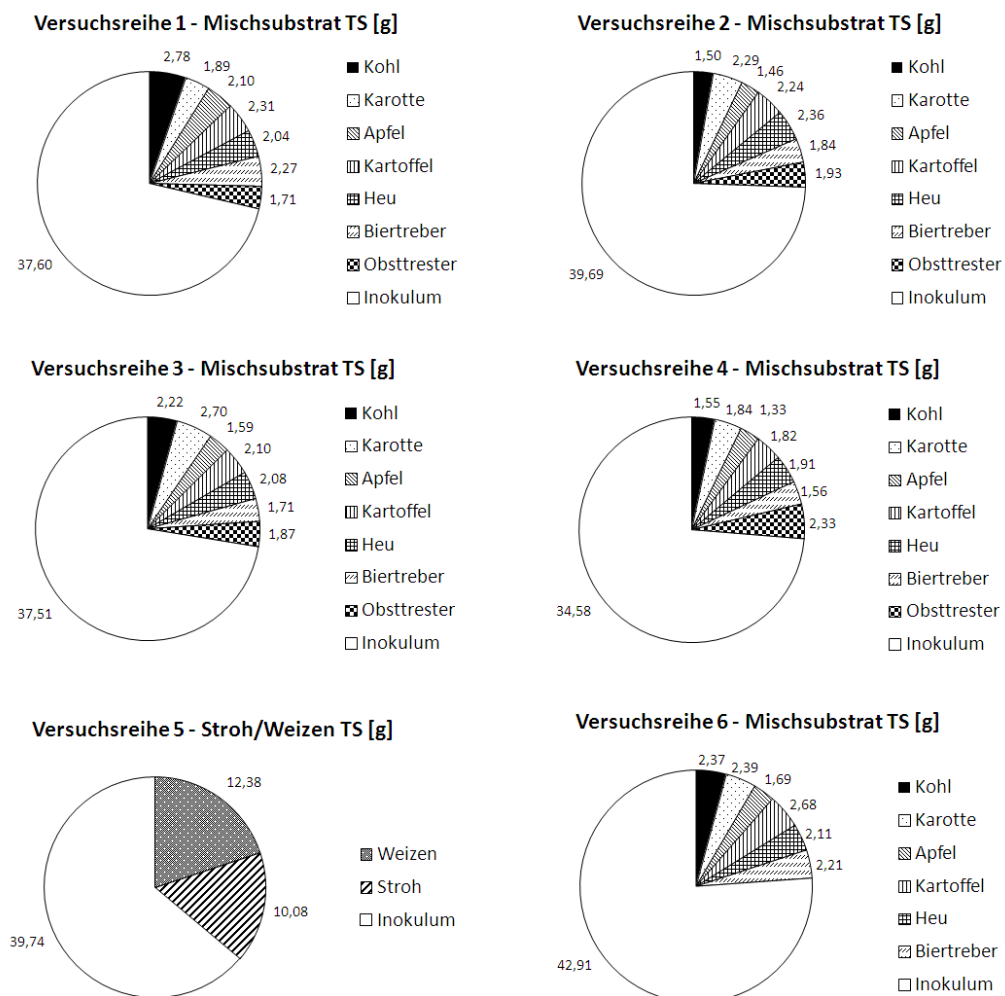


Abbildung 6.25: Zusammensetzung der Eingangssubstrate, Mittelwerte aller Versuchsansätze der Versuchsreihen

In den Eingangsanalysen der einzelnen Substratkomponenten stellte sich heraus, dass der Summenparameter CSB-Feststoff stärkeren Streuungen unterworfen war als der oTS oder TOC. Trotz mehrfacher Nachbestimmungen war es nicht möglich die Streuung und damit die Standardabweichung der Messwerte weiter zu reduzieren. Dies ist im Wesentlichen darin begründet, dass bei der Analytik stets nur sehr geringe Probenmengen verwendet werden konnten.

Anhand der Ergebnisse der biochemischen Analysen (van Soest Analytik) kann eine Einteilung der Substrate hinsichtlich der biochemischen Abbaubarkeit vorgenommen werden (Tabelle 6.14). Das Mischsubstrat weist einen Gehalt an leicht abbaubaren Stoffen von 58,4 bis 62,4 % auf. Der Anteil mittelmäßig bis schwer abbau-

barer Stoffe liegt zwischen 31,0 und 33,9 %. Der Anteil des anaerob nicht abbaubaren Lignins weist Werte zwischen 6,5 und 7,9 % auf.

Tabelle 6.14: Charakterisierung der Modellsubstrate hinsichtlich der Vergärbarkeit

Versuchsreihe	Gehalt an anaerob leicht abbaubaren Stoffen [gPr+gEx/kg oTS]	Gehalt an anaerob mittelmäßig abbau- baren Stoffen [gF+gHem/kg oTS]	Gehalt an anaerob schwer abbaubaren Stoffen [gCel/kg oTS]	Gehalt an anaerob nicht abbaubaren Stoffen [gLi/kg oTS]
V.1	603,6	140,7	180,2	75,5
V.2	583,7	146,1	193,3	77,0
V.3	606,9	131,2	183,8	78,1
V.4	595,4	132,1	193,4	79,1
V.5	442,3	306,6	196,6	54,5
V.6	624,2	152,4	157,9	65,4

Pr: Proteine

Ex: N-freie Extraktionsstoffe ohne Hemicellulose

F: Fette

Hem: Hemicellulose aus den N-freien Extraktionsstoffen

Cel: Cellulose

Li: Lignin

Tabelle 6.15: Quotienten und Gehalte des Kohlenhydrat-Lignin-Komplexes der untersuchten Substrate

Versuchsreihe	Cellulose/Lignin	Hemicellulose/Lignin	Kohlenhydrat- Lignin-Komplex [gCel+gH Cel+gL/goTS]
V.1	2,39	1,45	0,36
V.2	2,51	1,48	0,38
V.3	2,35	1,30	0,36
V.4	2,44	1,27	0,37
V.5	3,61	5,31	0,54
V.6	2,42	1,88	0,35

Wie im Kapitel 3.2 beschrieben, kann das Lignin mit den Stoffgruppen Cellulose und Hemicellulose einen Komplex bilden und dadurch den anaeroben Abbau dieser beiden Stoffgruppen erschweren oder verhindern. Nach Bekker [2007] kann der Grad der Inkrustierung mit Lignin durch den Quotienten aus Cellulose bzw. Hemicellulose und Lignin beschrieben werden. Je größer der Quotient, desto niedriger ist der anzunehmende Inkrustierungsgrad (Tabelle 6.15).

Aufgrund des geringen Ligninanteils in den Versuchssubstraten ist auch der errechnete Grad der Inkrustierung gering. Palmowski [2000] beschreibt eine Abnahme der Abbaubarkeit mit Zunahme des Ligningehalts. Bei 10 g/kg oTS nimmt demnach die Abbaubarkeit um etwa 1 % ab. Unter Berücksichtigung der Ligningehalte in der Tabelle 6.14 ist für die verwendeten Substrate ein maximaler anaerober Abbaugrad von größer 90 % zu erwarten. Das Substrat wird aufgrund seiner biochemischen Zusammensetzung als leicht bis mittelmäßig abbaubar eingestuft. Die Ergebnisse der halbtechnischen Untersuchungen zeigten, dass – wenn überhaupt – keine sehr deutlichen Effekte durch die Vakuum-Siede-Behandlung zu erwarten waren (vgl. Kapitel 6.2). Die leicht bis mittelmäßig abbaubare Substratmischung erscheint daher für die Untersuchung der in der Einleitung benannten Fragestellungen als geeignet auch geringe Effekte einer Vakuum-Siede-Behandlung durch beschleunigte Abbauvorgänge anzuzeigen.

6.3.3 Vorversuche

Das Ziel der Vorversuche war es, das anaerobe Abbauverhalten des Versuchssubstrates auf mögliche Abbauehemmungen zu überprüfen und ein geeignetes Verhältnis von Gärsubstrat und Inokulum zu finden. Zusätzlich erfolgten vergleichende Untersuchungen unter identischen Bedingungen mit frisch erfassten häuslichen Bioabfällen, um das Abbauverhalten des künstlich zusammengestellten Mischsubstrates mit realen Bioabfällen vergleichen zu können [Jacobs, 2009].

Die Summenkurven der Gasbildungen für das Mischsubstrat und den Bioabfall sind in der Abbildung 6.26 aufgetragen. Es ist deutlich erkennbar, dass das für die weiteren Versuche erstellte Mischsubstrat gegenüber dem Bioabfall bis auf die ersten Tage eine geringere Abbaugeschwindigkeit aufweist. Dies ist auf den bewusst gewählten höheren Anteil mittel bis schwer abbaubarer Bestandteile zurückzuführen.

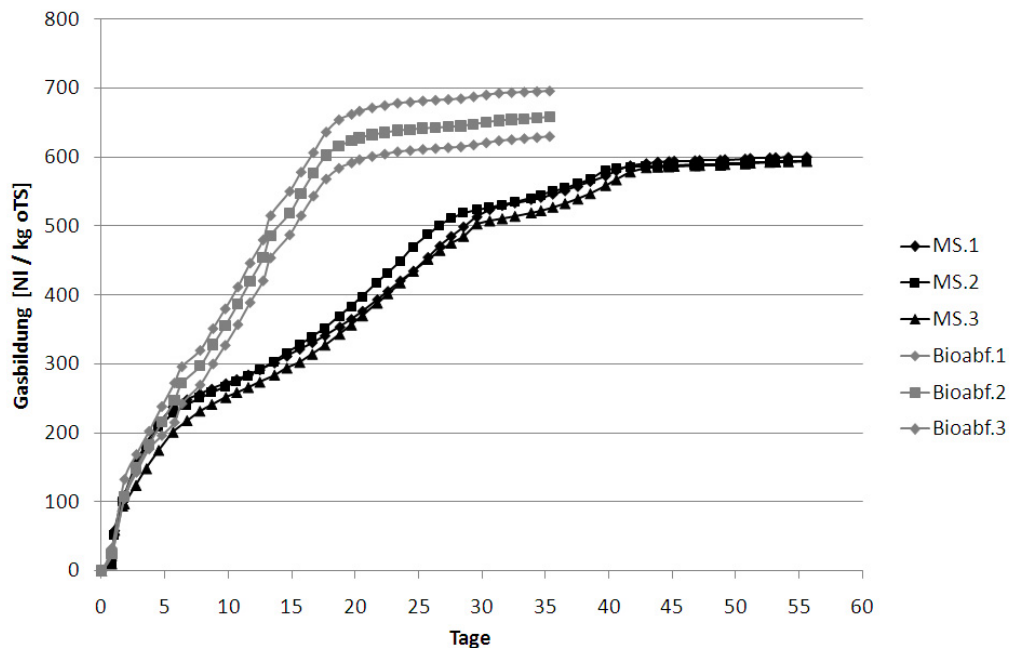


Abbildung 6.26: Summenkurven der Biogasbildung - Mischsubstrate und Bioabfall, Vorversuche

Die erzielte aufsummierte Biogasbildung der Gärversuche des Versuchssubstrates war ebenfalls geringer als die der Bioabfälle. Dies ist im Sinne der Fragestellung insofern von Bedeutung, als dass ein von sich aus sehr leicht und schnell abbaubares Substrat nur wenig Potenzial für eine Erhöhung der anaeroben Verfügbarkeit bzw. Abbaubarkeit aufweist. Im Vergleich zum Bioabfall kann das Mischsubstrat somit als anaerob schwerer abbaubar, aber dennoch vergleichbar eingeordnet werden und liegt – insbesondere für normale Aufenthaltszeiten von Anaerobfermentern – in einem mittleren bis gehobenen Bereich. Schattauer und Weiland [2006a] nennen Gaserträge für Bioabfällen in Höhe von 150 - 600 NI/kg oTS.

Die geringe Schwankungsbreite der Biogaserträge des Mischsubstrates ist auf die größere Homogenität dieses eigens zusammengestellten Substrates zurückzuführen. Die Ergebnisse der Vorversuche belegen die Eignung des Mischsubstrates für die Reihenuntersuchung zur Eignung der Vakuum-Siede-Behandlung als Vorbehandlung vor der Vergärung.

Während des Versuchsverlaufs wurden regelmäßig Messungen des pH-Wertes durchgeführt und im Verlauf der Versuche mehrfach Proben aus dem Gärsubstrat zur FOS/TAC-Analytik entnommen. Es zeigte sich für den anaeroben Abbau ein über die Versuchswiederholungen nahezu identischer Verlauf der pH-Werte, der als typisch

für ein derartiges Substrat eingestuft werden kann (vgl. Abbildung C.1) und keine Hemmungen oder Störungen des Prozesses. Für beide Versuchsreihen wurde ein annähernd gleiches Verhältnis $\text{oTS}_{\text{Substrat}}/\text{oTS}_{\text{Inokulum}}$ von etwa 0,5 angesetzt. Dieses wurde auch für die Gärversuche der labortechnischen Hauptversuche verwendet.

6.3.4 Gasbildungsraten

Die Gärtests mit den unterschiedlich behandelten Versuchssubstraten ermöglichen über die Gasbildungsraten einen direkten Nachweis der anaeroben Verfügbarkeit der organischen Inhaltsstoffe und deren Beeinflussung durch das Vorbehandlungsverfahren. Als zusätzliches Kriterium für die Wirksamkeit der Verfahrensvarianten findet die Gaszusammensetzung Berücksichtigung.

In der Abbildung 6.27 sind die Gasbildungsbeträge der Versuchsvarianten als Mittelwert der jeweiligen Wiederholungen aufgetragen (vgl. Tabelle C.8)

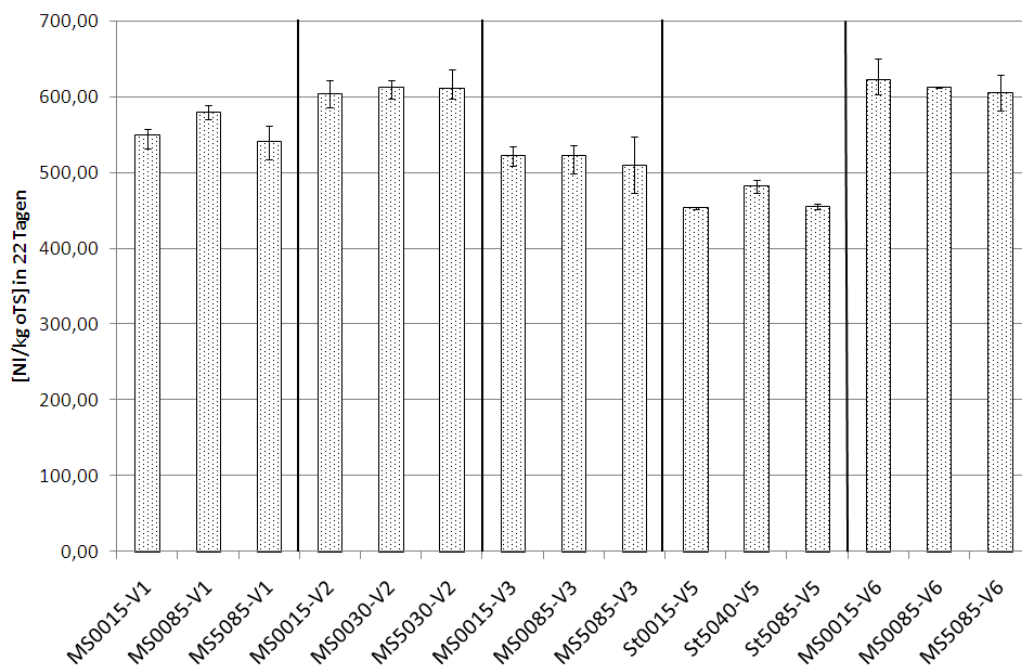


Abbildung 6.27: Gasbildungsbeträge der Versuchsvarianten, Mittelwerte

Wie in der Abbildung 6.27 zu erkennen ist, variieren die einzelnen Gasbildungsbeiträge der Varianten innerhalb der Versuchsreihen nur geringfügig. Auffällig ist, dass die Biogasproduktion der im Sinne der Fragestellung am stärksten behandelten Ansätze (50 mbar, 85 °C - MS5085-V.x) in keinem Fall die höchsten Erträge erbringen. Ein Einfluss der Vorbehandlung auf die Abbaugeschwindigkeit ist in Verläufen der

Summenkurven der Gasbildung nicht ersichtlich.

Die aufgrund der zusätzlich eingebrachten mechanischen Energie in der Versuchsdurchführung abweichende Versuchsreihe V.3 weist im Vergleich zu den anderen Varianten mit Mischsubstrat etwas geringere Biogasvolumina auf. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass auch bei größter Sorgfalt nicht 100 % des Substrates aus dem Edelstahltopf in die Gärgefäße überführt werden konnte, die jeweilige Bezugsgröße aber dennoch die ursprünglichen Substrateinwaage zu Versuchsbeginn ist.

In den Abbildungen 6.28 bis 6.32 sind die Mittelwerte der jeweiligen Parallelansätze der untersuchten Varianten aufgetragen (Summenkurven der Einzelansätze: vgl. Abbildungen C.2 bis C.6). Die in den Einzelansätzen der Versuchsreihen V.1 und V.2 ersichtlichen Ausreißer sind auf einen Fehler in der Kalibrierung des Messkopfes zurückzuführen und wurden bei der Bildung der Mittelwerte nicht berücksichtigt.

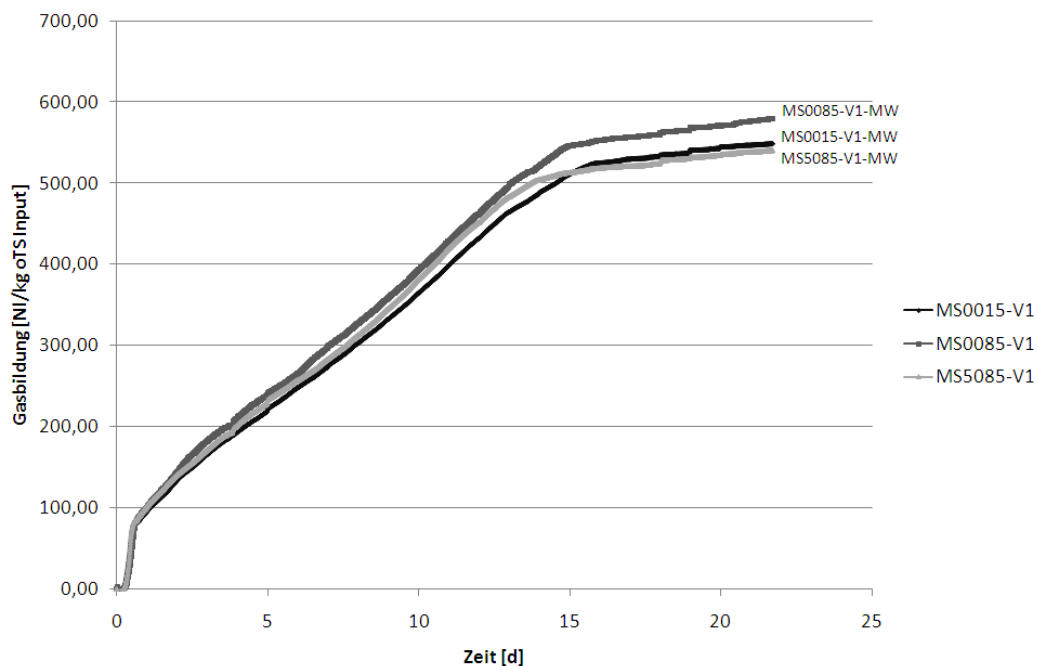


Abbildung 6.28: Summenkurven der Biogasbildung, Versuchsreihe V.1 - Mittelwerte

6.3 Versuchsergebnisse labortechnische Versuche

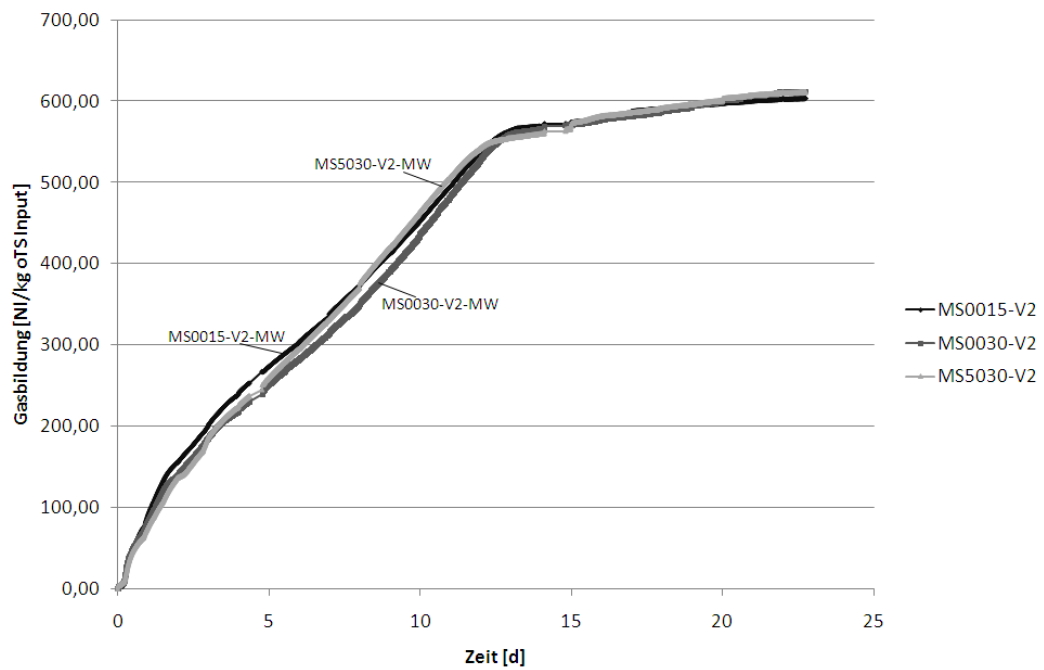


Abbildung 6.29: Summenkurven der Biogasbildung, Versuchsreihe V.2 - Mittelwerte

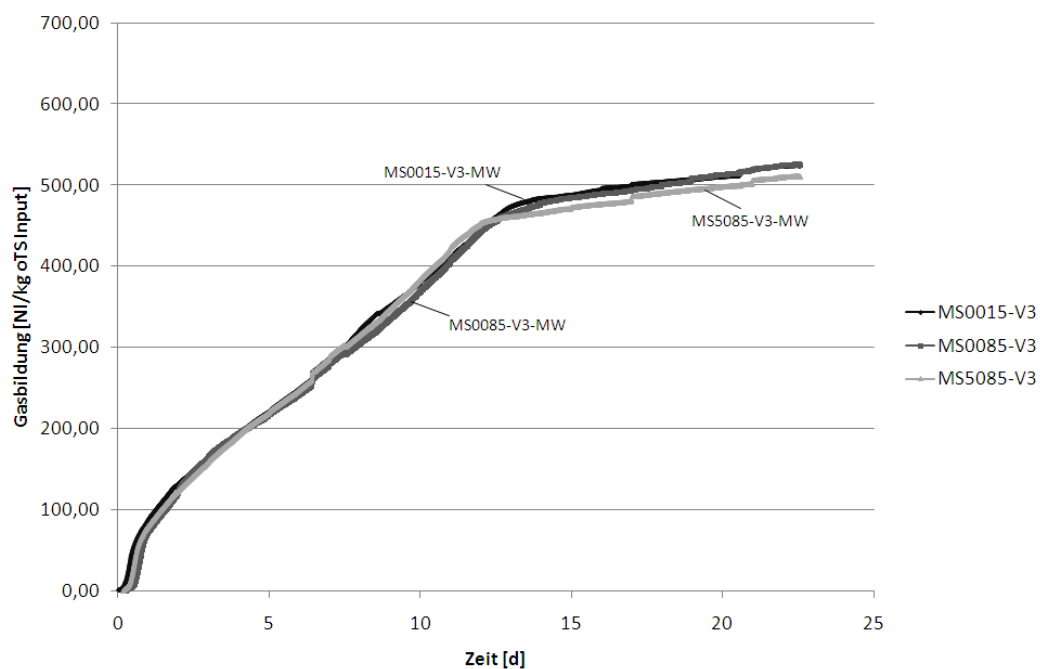


Abbildung 6.30: Summenkurven der Biogasbildung, Versuchsreihe V.3 - Mittelwerte

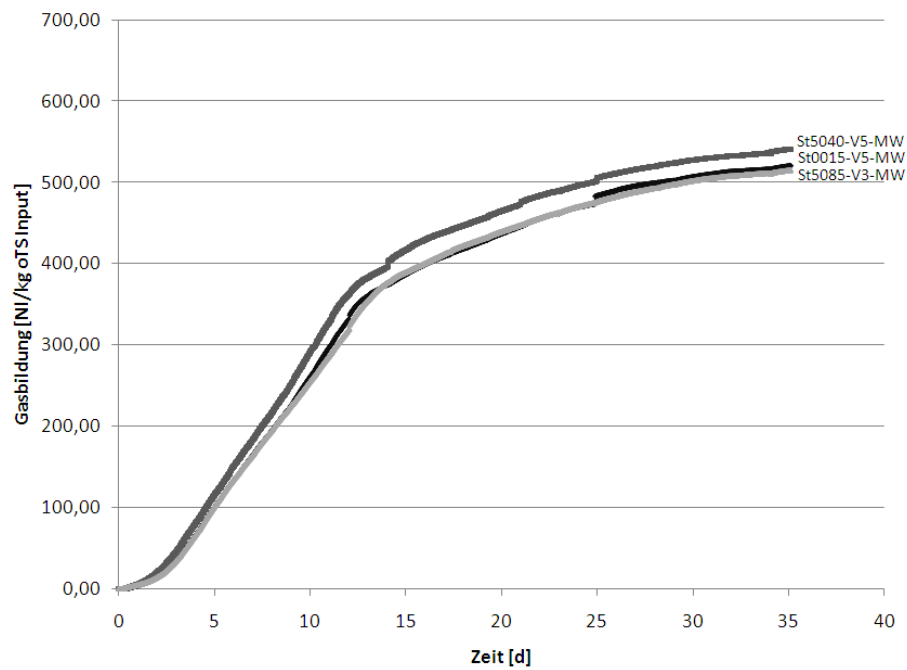


Abbildung 6.31: Summenkurven der Biogasbildung, Versuchsreihe V.5 - Mittelwerte

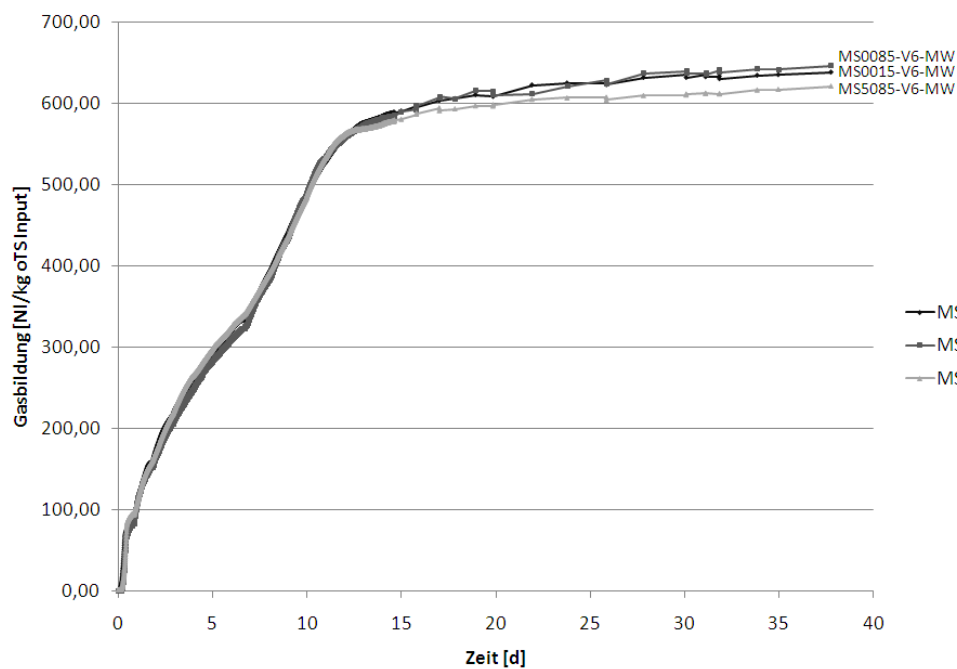


Abbildung 6.32: Summenkurven der Biogasbildung, Versuchsreihe V.6 - Mittelwerte

Innerhalb der Versuchsreihen zeigen sich keine signifikanten Unterschiede der Verläufe der Summenkurven, die auf einen positiven Einfluss der Vakuum-Siede-Behandlung hindeuten würden. Ein genauer Vergleich ist jeweils nur innerhalb der einzeln dargestellten Versuchsreihen möglich.

Erwartungsgemäß tritt keine Hemmung des anaeroben Abbaus zu Beginn der Gärversuche auf. Lediglich bei Versuchsreihe V.5 ist eine geringe Lag-Phase zu beobachten, die auf die anaerob etwas schwerer abbaubare Substratzusammensetzung zurückgeführt wird.

Ein nahezu gleiches Bild wie für die Gasbildungsrate zeigt sich beim Vergleich der Konzentrationsverläufe der einzelnen Gaskomponenten innerhalb der Versuchsreihen. Exemplarisch sind in der Abbildung 6.33 die Gaskonzentrationen von Methan, Kohlendioxid, Stickstoff und Sauerstoff über die Versuchsdauer aus Versuchsreihe V.1 aufgetragen. Auch hier lassen sich keine deutlichen Auswirkungen einer Vorbehandlung ausmachen.

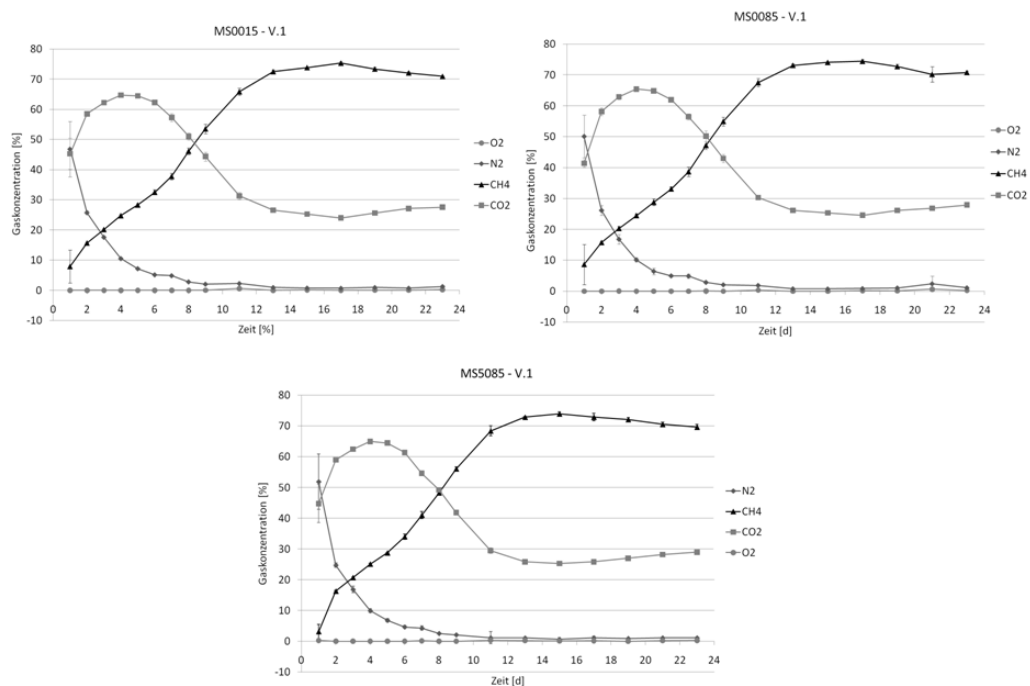


Abbildung 6.33: Verlauf der Gaskonzentrationen, Versuchsreihe V.1 - Mittelwerte

Die anfänglich hohe Konzentration an Stickstoff rührt daher, dass in den Versuchsreihen V.1 - V.5 die Ansätze vor Beginn der Gärversuche mit Stickstoff gespült wurden. Bei Versuchsreihe V.6 war dies nicht der Fall (vgl. Abbildungen C.7 bis C.10).

6.3.5 Organischer Abbau - zusätzliche Summenparameter

Zusätzlich zur Bestimmung des Einflusses auf die Gasbildungsraten wurde die Abbaugrade über die bereits im Eingangssubstrat analysierten Summenparameter bestimmt. Zur Berechnung der Abbaugrade wurden die Konzentrationen und Frachten der Ausgangssubstrate und der Output-Substrate nach den Gärversuchen abzüglich des jeweiligen Abbaus im Inokulum herangezogen (Gleichung 5.3, S. 102).

Ein eindeutiger Effekt der unterschiedlichen Vorbehandlungsintensitäten ist hier ebensowenig wie in den Ergebnissen der anaeroben Abbauprobversuche auszumachen. Die Abbauraten schwanken alle um einen Wert von 80 %. Die Signifikanz möglicher Effekte wird im Kapitel 6.3.7 näher betrachtet.

Die geringen Abbauraten des Parameters oTS in Versuchsreihe V.4 sind offenbar auf einen systematischen Messfehler zurückzuführen, der nicht mehr nachvollzogen werden konnte.

Die Mittelwerte und Streuungsbalken der Abbauraten sind in der Abbildung 6.34 dargestellt (vgl. Tabelle C.9). Die FS-, TS-, und oTS-Massen sowie die TOC- und CSB-Konzentrationen und Frachten der Versuchsansätze nach den Gärversuchen sind in Tabelle C.10 und C.11 wiedergegeben.

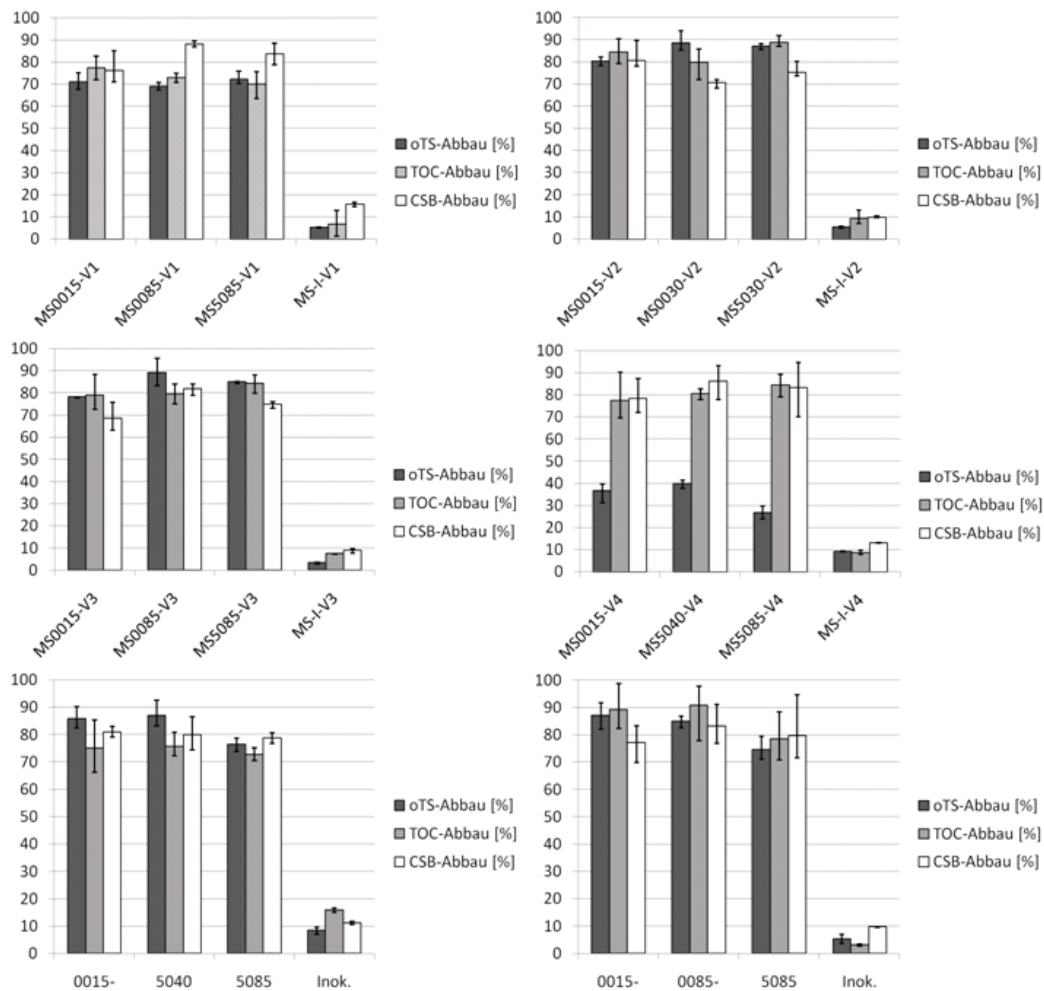


Abbildung 6.34: oTS-, TOC- und CSB-Abbau der Versuchsvarianten - Mittelwerte

6.3.6 Eluierversuche

Aufgrund der ursprünglichen Ausgestaltung des Behandlungsverfahrens, dass eine Überführung möglichst großer Anteile organischer, anaerob verfügbarer Fracht in eine flüssige Phase vorsah, wurden zusätzlich zu den oben beschriebenen direkten Abbauprobversuchen Eluierversuche durchgeführt. Hiermit sollte untersucht werden, ob die Vakuum-Siede-Behandlung eine Überführung organischer Fracht begünstigt (Versuchsdurchführung s. Kapitel 5.4.5).

In der Abbildung 6.35 ist die jeweilige Eluierbarkeit des Versuchssubstrates als prozentuale Überführung der organischen Fracht (ausgedrückt als TOC und CSB) des Ausgangssubstrates in das Eluat aufgetragen (vgl. Tabellen C.13 und C.14).

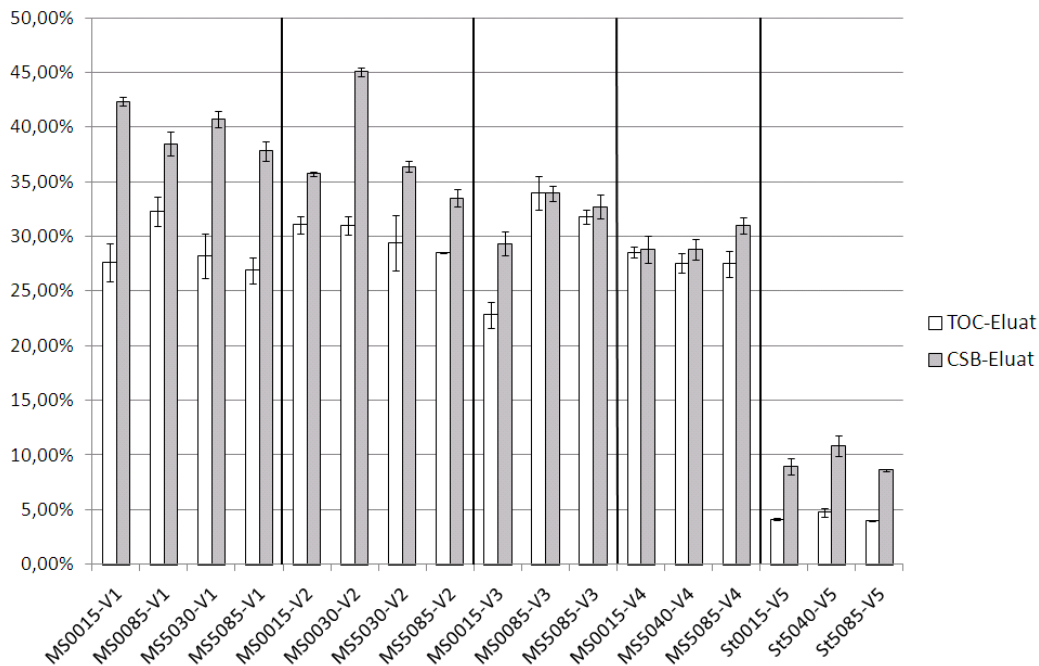


Abbildung 6.35: Eluierbarkeit der CSB- und TOC-Fracht der Versuchsvarianten - Mittelwerte

Die Ergebnisse weisen nicht auf einen Einfluss der gewählten Vorbehandlungsmethoden auf die Eluierbarkeit hin. Die Organik des in Versuchsreihe V.5 verwendeten Mischsubstrates aus Stroh und Weizenkörnern ist erwartungsgemäß deutlich schwerer zu eluieren als die des Mischsubstrates mit der dort enthaltenen Weichorganik. Die Signifikanz möglicher Effekte wird im Kapitel 6.3.7 näher betrachtet.

6.3.7 Varianzanalysen der Versuchsergebnisse

Gärversuche

Auch wenn bereits aus der grafischen Darstellung der Werte ersichtlich wird, dass die gewählten Behandlungsvarianten nur geringfügig voneinander abweichen, wurde zur Absicherung dieser Aussage die Werte unter Verwendung einer Varianzanalyse statistisch auf Signifikanz geprüft (vgl. Kapitel 5.5.4, Seite 104).

Verglichen wurden jeweils die unbehandelten Versuche einer Versuchsreihe mit den vakuum-siede-behandelten Versuchen (Tabelle 6.16) und die wärmebehandelten Versuche gegen die vakuum-siede-behandelten Versuche (Tabelle 6.17). Bei den Versuchsreihen V.4 und V.5 wurde keine Variante mit alleiniger Wärmebehandlung durchgeführt. Verglichen wurden hier die beiden Vakuum-Varianten. Varianzana-

lysen, die zu dem Ergebnis führen, dass zwischen den jeweils verglichenen Werten signifikante Unterschiede im gewählten Signifikanzniveau bestehen sind fett gedruckt.

Der hohe Wert der Testgröße F bei der Varianzanalyse der Gasbildung der wärme-behandelten und der vakuum-siede-behandelten Versuchsvariante der Versuchsreihe V.5 ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass hier für die wärmebehandelten Versuche aufgrund eines technischen Defekts an der Versuchsanlage nur zwei Wiederholungen in die Auswertung aufgenommen werden konnten und die beiden Ansätze nahezu gleich hohe Gasbildungsraten aufweisen. Weiterhin liefert – wenn überhaupt – ein signifikanter Unterschied vorliegt – die wärmebehandelte Variante einen höheren Gasertrag als die vakuum-siede-behandelte.

Die Varianzanalysen des Parameters oTS liefern zum Teil Werte, die zur Ablehnung der Hypothese H_0 führen müssten. In den Varianzanalysen der nicht behandelten gegen die vakuum-siede-behandelten Versuchsvarianten liegen alle Werte bis auf den in Versuchsreihe V.1 über dem kritischen Wert des F-Quantils 7,71. Es kann daher geschlussfolgert werden, dass der oTS-Abbau der beiden jeweils verglichenen Varianten signifikant voneinander abweicht. Demnach könnte bei alleiniger Betrachtung dieses Parameters davon ausgegangen werden, dass die Vakuum-Siede-Behandlung einen positiven Effekt auf die Abbaubarkeit des Substrates hat.

Tabelle 6.16: Werte der Testgröße F der einfaktoriellen ANOVA - unbehandelt vs. vakuum-siede-behandelt

Verglichene Varianten	Gasbildung F	oTS-Abbau F	TOC-Abbau F	CSB-Abbau F
MS0015-V1 MS5085-V1	0,31	0,21	2,37	2,03
MS0015-V2 MS5030-V2	0,02	25,01	1,56	9,76
MS0015-V3 MS5085-V3	0,37	442,73	0,92	2,62
MS0015-V4 MS5085-V4		9,93	0,99	0,31
MS0015-V5 St5085-V5	0,15	11,46	0,15	1,99
MS0015-V6 MS5085-V6	0,81	16,47	2,31	0,08

Tabelle 6.17: Werte der Testgröße F der einfaktoriellen ANOVA - wärmebehandelt vs. vakuum-siede-behandelt

Verglichene Varianten	Gasbildung F	oTS-Abbau F	TOC-Abbau F	CSB-Abbau F
MS0085-V1 MS5085-V1	0,99	2,81	0,56	2,15
MS0030-V2 MS5030-V2	0,00	0,07	4,27	5,62
MS0085-V3 MS5085-V3	0,32	1,23	1,87	17,08
MS5040-V4 MS5085-V4		41,01	1,42	0,13
St5040-V5 St5085-V5	160,68	10,13	0,95	0,11
MS0085-V6 MS5085-V6	0,26	8,93	2,19	0,17

Bezieht man jedoch die Varianzanalyse der wärmebehandelten Variante (bzw. anderen Vakuumvarianten bei V.4 und V.5) gegen die vakuum-siede-behandelten Variante in die Betrachtung mit ein, zeigt sich, dass lediglich für die Versuchsreihen V.4, V.5 und V.6 signifikante Abweichungen der beiden Varianten vorliegen. Diese Abweichungen weisen zudem darauf hin, dass jeweils bei der schwächer behandelte Variante ein höherer oTS-Abbau als bei der vollen vakuum-siede-behandelten Variante erreicht wurde. Es ist anzumerken, dass der oTS-Abbau der Versuchsreihe V.4 außerordentlich niedrig ausfällt. Es ist davon auszugehen, dass für diesen Parameter der Versuchsreihe ein systematischer Fehler vorliegt.

Der Parameter TOC weist keine signifikanten Abweichungen innerhalb der betrachteten Varianten auf.

Die signifikanten Abweichungen der CSB-Abbaugrade sind dergestalt, dass die Werte aus jeweils schwächer oder nicht behandelten Versuchsvarianten einen höheren CSB-Abbau aufweisen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass keine belastbaren signifikant positiven Effekte der Vakuum-Siede-Behandlung erkennbar sind. Dies gilt insbesondere für den verfahrensspezifischen Neuheitsgrad der Vakuumbehandlung.

Eluierversuche

Die gleiche Art der Varianzanalyse wie für die anaeroben Abbauprobversuche wurde für die Eluierversuche durchgeführt. Untersucht wurden die in das Eluat überführten Anteile [%]. Wie in der Tabelle 6.18 ersichtlich, liegen alle untersuchten Paarungen deutlich unter dem kritischen Wert des F-Quantils von 7,71. Die Streuung der Ergebnisse der einzelnen Versuchswiederholungen liegt statistisch über einer Auswirkung der Behandlungsintensität der jeweiligen Variante. Ein positiver Effekt der Vakuum-Siede-Behandlung auf die Eluierbarkeit ist nicht nachweisbar.

Tabelle 6.18: Werte der Testgröße F der einfaktoriellen ANOVA - Eluierversuche

Verglichene Varianten	TOC eluiert F	CSB eluiert F	Verglichene Varianten	TOC eluiert F	CSB eluiert F
MS0015-V1	0,00	0,01	MS0085-V1	0,00	0,00
MS5085-V1			MS5085-V1		
MS0015-V2	0,00	0,00	MS0030-V2	0,00	0,06
MS5085-V2			MS5030-V2		
MS0015-V3	0,01	0,00	MS0085-V3	0,00	0,00
MS5085-V3			MS5085-V3		
MS0015-V4	0,00	0,00	MS5040-V4	0,00	0,00
MS5085-V4			MS5085-V4		
St0015-V5	0,00	0,00	St5040-V5	0,00	0,00
St5085-V5			St5085-V5		

6.3.8 Korrelation der Messdaten

Im Rahmen der hier dargestellten labortechnischen Versuche wurden verschiedene Parameter zur Untersuchung einer möglichen Wirksamkeit der Vakuum-Siede-Behandlung auf die anaeroben Abbaubarkeit bzw. Extrahierbarkeit der organischen Komponenten analysiert und ausgewertet. Zur Überprüfung der Belastbarkeit der erhobenen Daten wurde neben den bereits erläuterten Varianzanalysen die Korrelation der verschiedenen Parameter überprüft. Es zeigte sich ein weitgehend einheitliches Bild, dass hier lediglich exemplarisch an zwei Beispielen erläutert werden soll. Die Abbildung 6.36 zeigt die Korrelation der Werte des TOC-Abbaus mit denen der Gasbildung und des oTS-Abbaus (für oTS ohne Versuchsreihe V.4). Die Regressionsgerade hat ein Bestimmtheitsmaß, das keine statistische Korrelation der Daten zulässt. Es ist jedoch ein Trend in der Punktwolke auszumachen, der einen Zusammenhang in

der zu erwartenden Weise zeigt. Regressionsgeraden über alle Einzelmessdaten weisen ein höheres Maß an Streuung auf, lassen diesen Trend jedoch weiterhin erkennen.

Die geringe Korrelation der Daten wird darauf zurückgeführt, dass die Messwerte der einzelnen Versuche vergleichsweise dicht beieinander liegen und keine belastbaren signifikanten Unterschiede aufweisen. Wären Unterschiede im Abbauverhalten deutlich über der Streuung der Messwerte aufgetreten, wäre ein deutlicherer Trend mit höheren Bestimmtheitsmaßen der Regressionsgeraden zu erwarten gewesen.

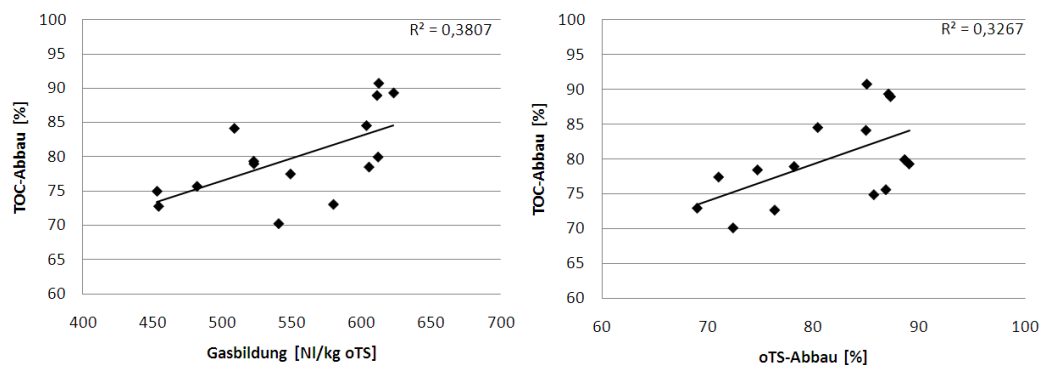


Abbildung 6.36: Korrelation der Messdaten analysierter Parameter - Mittelwerte

6.3.9 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse der labortechnischen Versuche zeigen, dass die Vakuum-Siede-Behandlung keinen signifikanten positiven Einfluss auf die anaerobe Abbaubarkeit des Versuchssubstrates hat. Das gleiche gilt für den ebenfalls untersuchten Einfluss auf die Eluierbarkeit organischer Komponenten. Wenn überhaupt eine positive Beeinflussung durch die Vorbehandlung ausgemacht werden konnte, kann tendenziell der Wärmebehandlung eine Wirksamkeit attestiert werden. Dies entspricht den in der Literatur belegten Einflüssen einer Wärmebehandlung (vgl. Kapitel 4.4.3).

Viele der dort beschriebenen Behandlungsverfahren arbeiten jedoch mit erhöhter Temperatur (meist höher als in den Vakuum-Siede-Versuchen) und Überdruck. Derartige Verfahren haben im Vergleich zu dem in der vorliegenden Arbeit untersuchten Ansatz den Vorteil, dass geringere Mengen an Brüden bzw. Kondensat anfallen. Leicht flüchtige Komponenten mit hohem Dampfdruck werden dem Substrat im Vakuum-Siede-Verfahren über die Dampfphase entzogen. Eine Fassung dieses Anteils ist nur über geeignete Kondensationsfallen möglich, deren Betrieb jedoch zusätzliche energetische Aufwendungen voraussetzt.

Auch ein Einfluss schlagartiger Druckänderungen konnte nicht festgestellt wer-

den. Im Vergleich zu den anderen Versuchsreihen konnte in diesen labortechnischen Untersuchungen eine schlagartige Einstellung des Unterdrucks erreicht werden, da der Reaktor der halbtechnischen Anlage als vorgelagerter Unterdruckbehälter mit deutlichem größeren Volumen als das der verwendeten zwei Liter Versuchsgefäße zur Verfügung stand.

Die in Versuchsreihe V.3 zusätzlich eingebrachte mechanische Energie konnte die Wirksamkeit der Vakuum-Siede-Behandlung nicht verbessern.

Es kann festgestellt werden, dass die Vakuum-Siede-Behandlung zu keiner signifikant verbesserten Vergärbarkeit oder Eluierbarkeit der untersuchten organischen Substrate führte. Da überlagernde Einflussgrößen aufgrund der labortechnischen Umsetzung der Versuche ausgeschlossen wurden, kann mit großer Sicherheit davon ausgegangen werden, dass diese Ergebnisse auch auf andere Substrate und im Rahmen der untersuchten Größenordnung variierende Prozessbedingungen übertragbar sind.

Wie erwartet, hat sich das künstlich erstellte Versuchssubstrat als geeignet für die Durchführung der Reihenversuche erwiesen. Die Wiederholungsgenauigkeit der einzelnen Versuchsvarianten war deutlich höher als dies mit realen biologischen Abfällen möglich gewesen wäre. Auch wenn das Substrat für jede Versuchsreihe frisch zusammengestellt wurde und es hierdurch zu geringen Schwankungen in der stofflichen Zusammensetzung kam, ist eine Auswertung auch über die Grenzen der einzelnen Reihen insofern möglich, als dass auftretende Unstimmigkeiten und Messfehler in den meisten Fällen schnell erkannt und durch Zusatzanalysen bereinigt werden konnten.

Aufgrund der langen Versuchsdauer der anaeroben Abbauprobversuche von zum Teil mehr als 30 Tagen hätte bei der Verwendung biologischer Abfälle zusätzlich die stoffliche Veränderung der Abfälle im Jahresgang berücksichtigt werden müssen. Einflüsse der Materialgrößenverteilung im Versuchssubstrat konnten durch eine definierte Zerkleinerung der stückigen Komponenten auf Kantenlängen von etwa einem Zentimeter weitgehend ausgeschlossen werden.

Kapitel 7

Diskussion und Schlussfolgerungen

7.1 Die Vakuum-Siede-Behandlung als Bestandteil anaerober Verfahren

Zielsetzung der vorliegenden Arbeit war es, die Vakuum-Siede-Behandlung als Bestandteil anaerober Abbauprozesse zu untersuchen, wesentliche Einflussparameter zu identifizieren und – im Falle der Wirksamkeit – eine Optimierung des Verfahrens vorzunehmen. Die Vakuum-Siede-Behandlung wurde als Vorbehandlungsverfahren bzw. als Bestandteil zweistufiger, zweiphasiger Anaerobverfahren eingeordnet. Die erstgenannte Einordnung wäre dann folgerichtig, wenn das Verfahren wesentliche Auswirkungen der ersten Stufe des anaeroben Abbaus, der Hydrolyse, vorwegnehmen kann.

Hierfür waren zwei wesentliche Fragestellungen zu bearbeiten:

- Kann eine Vakuum-Siede-Behandlung eine Überführung möglichst gelöster organischer Komponenten in eine Flüssigphase begünstigen (Extraktion)?
- Kann eine Vakuum-Siede-Behandlung zur Erhöhung der anaeroben Verfügbarkeit organischer Komponenten beitragen?

Ein Vorbehandlungsverfahren oder ein zusätzlicher verfahrenstechnischer Schritt in einem Anaerobprozess kann ökonomisch und ökologisch nur dann sinnvoll eingesetzt werden, wenn hierdurch die Energieeffizienz des Gesamtverfahrens erhöht wird. Eine Beurteilung möglicher positiver Auswirkungen der Vakuum-Siede-Behandlung muss daher auch im Hinblick auf zusätzliche energetische Aufwendungen erfolgen. Aufgrund bereits vorliegender Ergebnisse zu ähnlichen Verfahren in der Literatur und des grundsätzlichen Bedarfs an energieeffizienten Vorbehandlungsverfahren wurde der Forschungsbedarf für die Vakuum-Siede-Behandlung abgeleitet (vgl. Kapitel 4).

7.2 Versuchsergebnisse

7.2.1 Erfahrungen mit einer großtechnischen Pilotanlage

Zu Beginn der Bearbeitung der oben genannten Aufgabenstellungen erfolgten orientierende Untersuchungen an einer bereits bestehenden großtechnischen Pilotanlage (vgl. Kapitel 5.2 und 6.1). Die hier gesammelten Erfahrungen und die vorliegenden Versuchsergebnisse zeigen, dass die Vakuum-Siede-Behandlung mit anschließender Extraktion einer mit Organik angereicherten Flüssigphase technisch funktionsfähig – wenn auch in der vorliegenden verfahrens- und anlagentechnischen Umsetzung optimierungsbedürftig – ist. Optimierungsbedarf war insbesondere hinsichtlich des Energiebedarfs sowie der Widerstandsfähigkeit gegen Verschleiß gegeben.

Erste eigene Versuchsergebnisse sowie vorliegende Ergebnisse aus Vorversuchen [Widmer, 2001] wiesen auf erhöhte Extraktionsleistungen bei guter Vergärbarkeit hin. Auch für die Extraktionsleistung und einen hiermit einhergehenden Aufschluss organischer Substrate wurde weiterer Optimierungsbedarf identifiziert.

Differenzierte Untersuchungen der Wirkmechanismen konnten auf der großtechnischen Versuchsanlage nicht vorgenommen werden.

7.2.2 Ergebnisse der halb- und labortechnischen Versuche

Die Ergebnisse der halbtechnischen Versuche zeigen keine signifikant erhöhten Extraktionsleistungen gelöster CSB-wirksamer Komponenten und keine erhöhten Gasbildungsraten aufgrund einer vorhergegangenen Vakuum-Siede-Behandlung, die zweifelsfrei der Vakuum-Behandlung zugeordnet werden können. Erhöhte CSB-Frachten in den Pressaten sind eher eine Folge der thermischen und mechanischen Beanspruchung der Versuchssubstrate und beruhen wesentlich auf einer Überführung fein verteilter Feststoffe in die abgepresste Suspension.

Dem für die Fest-Flüssig-Trennung eingesetzten Aggregat kommt eine wesentliche Relevanz zu. Sowohl der spezifische Pressdruck, als auch die in der Schneckenpresse zusätzlich wirkenden Scherkräften beeinflussen offensichtlich einen Aufschluss sowie eine Zerkleinerung der eingesetzten Substrate. Die Einflüsse mechanischer Beanspruchungen sind in dieser Weise auch in der Literatur belegt (vgl. Kapitel 4.4.2). Auch der positive Einfluss thermischer Vorbehandlungsverfahren auf die Erhöhung der anaeroben organischen Verfügbarkeit ist hinreichend in der Literatur belegt (vgl. Kapitel 4.4.3).

Erhöhte Prozesswassermassen führen in der Vorbehandlung von Maissilage zu erhöhten Extraktionsleistungen und in Folge dessen zu erhöhten Gasbildungsraten in

Bezug auf die organische Trockensubstanz des Ausgangssubstrates. Für Bioabfälle konnte dieser Effekt nicht nachgewiesen werden.

Unter Ausschluss überlagernder Effekte durch variierte Prozesswasserbeimischungen und mechanischer Beanspruchungen einer Fest-Flüssig-Trennung konnten die Ergebnisse der halbtechnischen Versuche in labortechnischen Versuchen bestätigt werden.

Eine Behandlung unter Vakuum-Siede-Bedingungen führte auch hier nicht zu signifikant erhöhten Gasbildungsraten im Verlauf der Gärversuche. Aus den Ergebnissen der rein thermisch vorbehandelten Substrate lassen sich tendenziell erhöhte Abbauraten ableiten. Eine Überführung signifikant erhöhter Anteile gelöster organischer Komponenten nach den untersuchten Vorbehandlungsvarianten konnte nicht festgestellt werden. Auch eine zusätzlich eingebrachte mechanische Beanspruchung der Substrate während der Vakuum-Siede-Behandlung zeigte keine positiven Auswirkungen.

In der Herleitung des Forschungsbedarfs (Kapitel 4.5) wurde auf bereits in der Literatur vorliegende Untersuchungsergebnisse verwiesen, die mit erhöhten Temperaturen und korrespondierenden hohen Drücken zu einer Erhöhung der Verfügbarkeit der organischen Substanz beitragen konnten. Die Zusammenwirkung einer thermischen Behandlung und deutlich veränderter Druckverhältnisse sowie schlagartiger Druckänderungen wurden als ursächlich für die Wirksamkeit derartiger Vorbehandlungsverfahren angenommen. Im Kapitel 7.3 werden mittels grundsätzlicher physikalischer und thermodynamischer Modellvorstellungen Erklärungsansätze für die Unwirksamkeit der Vakuum-Siede-Behandlung im Vergleich zu Thermo-Druck-Verfahren abgeleitet und diskutiert.

7.3 Entwicklung grundsätzlicher Modellvorstellungen

Wie in der Darstellung und Diskussion der Versuchsergebnisse gezeigt werden konnte, ist durch die Vakuum-Siede-Behandlung keine Erhöhung der Extrahierbarkeit oder Vergärbarkeit und auch keine signifikante Beschleunigung des anaeroben Abbauprozesses zu erreichen. Im Kapitel 4 wurden zahlreiche Aufschlussverfahren beschrieben, mit denen durch deutliche und teilweise abrupte Änderungen des Drucks sowie unter Wärmezufuhr zum Teil erhebliche Verbesserungen des Aufschlusses organischer Substrate und in dessen Folge zusätzliche oder beschleunigte Gasbildungsraten erreicht werden konnten.

Wie bereits im Kapitel 3.2.3 hergeleitet, war nicht davon auszugehen, dass eine

alleinige Druckänderung in den im Literaturteil beschriebenen und im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Größenordnungen ($\Delta p < 50$ bar) wesentlich zu einem zusätzlichen Aufschluss pflanzlicher Zellen beitragen kann. Über Verfahren, die zusätzlich eine Temperaturbehandlung des Substrates vorsahen, liegen zahlreiche positive Forschungsergebnisse vor (vgl. Kapitel 4.4.3). Zum Vergleich dieser Verfahrensvarianten mit hohen Temperaturen und hohen Drücken wurden drei stark vereinfachte Modellvorstellungen abgeleitet, die Erklärungsansätze für die ausbleibende Wirksamkeit der Vakuum-Siede-Behandlung liefern sollen. In einem großen Teil der zitierten Arbeiten werden Behandlungsverfahren bei Temperaturen von 150 - 250 °C beschrieben. Für den Vergleich von Behandlungsverfahren bei Überdruck mit dem untersuchten Unterdruckverfahren (0,05 bar) wurde daher eine Behandlungstemperatur von 200 °C und der dazugehörige Dampfdruck von etwa 15 bar angenommen.

Sämtliche Modellvorstellungen werden unter folgenden Vereinfachungen und Annahmen betrachtet:

- Die Form der pflanzlichen Zelle ist die einer idealen Kugel,
- die pflanzlichen Zellen sind vollständig mit einem inkompressiblem Fluid gefüllt,
- dieses Fluid hat die gleichen Eigenschaften wie Wasser,
- die pflanzlichen Zellen haben zu Beginn der Behandlung einen Turgor von 5 bar,
- Volumen- und Turgoränderungen bleiben unberücksichtigt,
- die pflanzlichen Zellen haben einen Durchmesser von 100 μm (Länge pflanzlicher Zellen meist 5 - 100 μm , manche erheblich länger [Raven et al., 2006]),
- Gase und Wasserdampf verhalten sich in erster Näherung wie ein ideales Gas,
- die Zellen schweben frei im Gasraum (Wechselwirkungen mit einer sie umschließenden festen oder flüssigen Matrix finden nicht statt),
- der Gasraum (Volumen 1 Liter) ist gefüllt mit Wasserdampf,
- die Zustandsbedingungen sind adiabat,
- es erfolgten kein Stoffaustausch und keine stofflichen Umbildungen (z.B. chemische Prozesse),
- es werden stationäre Bedingungen betrachtet.

7.3.1 Modellvorstellung zur auf die pflanzliche Zellwand wirkenden Kraft aufgrund eines Druckes

Im ersten Modellvergleich bleiben Beeinflussungen durch die Temperatur unberücksichtigt. In Szenario A bewirkt der in der Druckkammer anliegende Überdruck eine allseitige Kraft von außen auf die Zellwand, im Fall der Vakuum-Behandlung erfährt die Zellwand aufgrund des Turgors eine Krafteinwirkung von innen (Abbildung 7.1).

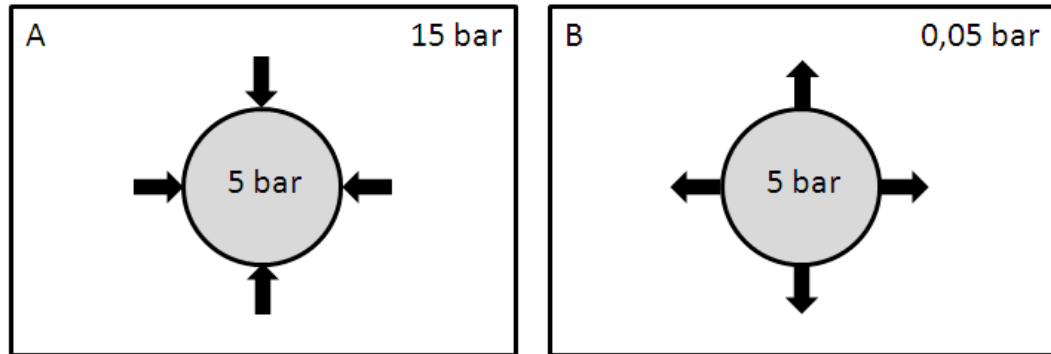


Abbildung 7.1: Modellvorstellung der Krafteinwirkung auf die Zellwand durch Druck (A: Druckbehandlung, B: Vakuumbehandlung)

Entscheidend für die Berechnung der auf die Zellwand wirkenden Kraft ist die jeweils herrschende Druckdifferenz zwischen Druckkammer und Zellinnenraum. Gemäß Gleichung 7.1 ergibt sich für Fall A eine von außen auf die Zellwand wirkende Kraft von 100 N/cm², für Fall B 49,5 N/cm².

$$p = \frac{\vec{F}_{\perp}}{A} \quad (7.1)$$

p	[Pa]	Druck
\vec{F}_{\perp}	[N]	senkrecht auf die Oberfläche wirkende Kraft
A	[m ²]	Fläche

Die auf die Oberfläche der Zelle wirkende Kraft beträgt 0,0314 N bzw. 0,0156 N. Im Falle der Vakuum-Behandlung wirkt etwa die Hälfte der in der Druckbehandlung auf die Zelle wirkenden Kraft. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich in der Zelle ein in erster Näherung inkompressibles Fluid befindet und allseitiger Druck daher keinen Verformungseffekt haben kann. Im Fall der Unterdruckbehandlung entspricht die von innen wirkende Kraft einer Erhöhung des hydrostatischen Zellinnendrucks um

etwa 0,95 bar unter atmosphärischen Bedingungen. Wie im Kapitel 3.2.3 beschrieben, liegt ein derartiger Druck im normalen Bereich des Turgors pflanzlicher Zellen.

Weder unter Überdruck- noch Unterdruckbedingungen ist daher ein desintegrierender Einfluss auf pflanzliche Zellen und Strukturen zu erwarten.

7.3.2 Modellvorstellung zur Einwirkung der inneren Energie einer Druck- und Unterdruckbehandlung

Nach dem Prinzip der Brownschen Molekularbewegung ist das Ausmaß der Bewegung einzelner Moleküle temperaturabhängig. Daraus folgt, dass in einem System, welches hoher Temperatur ausgesetzt ist und eine hohe Moleküldichte aufweist, die Bewegung der Teilchen stärker ist und die Wahrscheinlichkeit einer gegenseitigen Beeinflussung der Teilchen untereinander bzw. durch das System selbst (Stöße mit Wänden und Oberflächen) höher ist, als in einem System mit geringerer Temperatur und Moleküldichte. Diese grundlegende Überlegung kann für den Vergleich einer Thermo-Druck-Behandlung mit der Vakuum-Siede-Behandlung herangezogen werden. In Abbildung 7.2 ist die größere Anzahl von Molekülen – für diesen Fall dampfförmige Wasserdampfmoleküle – durch die Anzahl der Punkte, die stärkere Molekülbewegung durch die Länge der Pfeile angedeutet.

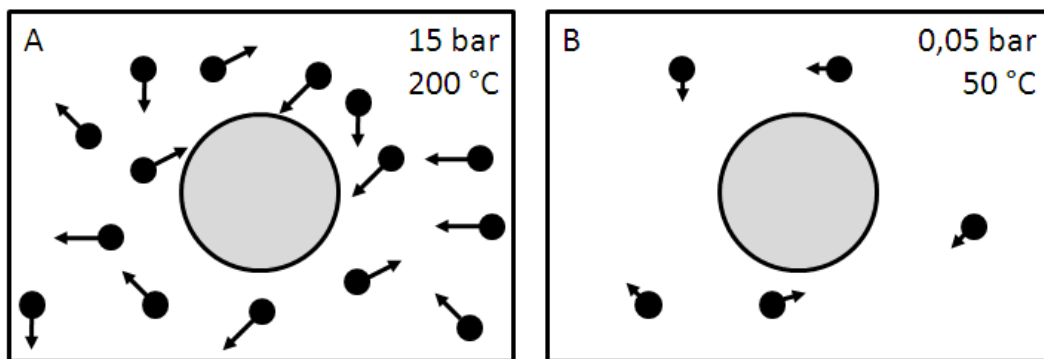


Abbildung 7.2: Modellvorstellung zur Brownschen Molekularbewegung (A: Druckbehandlung, B: Vakuumbehandlung)

Die für die Vakuum-Siede-Behandlung angesetzte Temperatur von 50 °C ergibt sich daraus, dass es aufgrund der Verdunstung von Wasser in Folge der Vakuum-Behandlung zur allmählichen Abkühlung des zuvor auf 85 - 90 °C erwärmten Substrates kommt. Derartige Verringerungen der Temperatur konnten auch im Verlauf der halbtechnischen Versuche festgestellt werden.

Laut Lüdecke und Lüdecke [2000] ist die innere Energie definiert als die Energie,

die im Inneren des Systems gespeichert ist. Sie hängt vom inneren Zustand des Systems ab und besteht aus der kinetischen und potentiellen Energie aller das System aufbauenden Teilchen, der Moleküle, Atome, Elektronen und Nukleonen, sowie aus der Energie innerer elektrischer und magnetischer Felder. Die hierin enthaltene thermische Energie ist die in der Bewegung der Teilchen, sei es Translation, Rotation oder Oszillation, gespeicherte kinetische und potenzielle Energie einschließlich der Energie der zwischen ihnen wirkenden Abstoßungs- und Anziehungskräfte. Die ebenfalls enthaltene chemische Energie ist die Energie der zwischen den Atomen eines Moleküls wirkenden Bindungskräfte; sie ist die Energie der Anziehung der Elektronen und Atomkerne. Hinzu käme noch die nukleare Energie, die jedoch im vorliegenden Fall ebenso wie die chemische Energie unberücksichtigt bleiben können, da keine chemischen Reaktionen oder Kernreaktionen betrachtet werden sollen. Im vorliegenden Fall werden die kinetische und die potentielle Energie auf makroskopischer Ebene nicht weiter betrachtet. Die innere Energie ist – vereinfacht ausgedrückt – die Summe der Bewegungs- und Lageenergie der einzelnen Moleküle, aus denen das System besteht.

Die innere Energie für den vorliegenden Betrachtungsfall hängt daher von der Temperatur ab, da die Bewegungsenergie der Teilchen mit der Temperatur zunimmt und von der Teilchendichte, da die zwischenmolekularen Wechselwirkungskräfte bei kleinen Molekülabständen wirksam werden. Diese Teilchendichte kann als Funktion des Volumens bzw. des Drucks verstanden werden. Für reine homogene Stoffe hängt die innere Energie von zwei der drei thermischen Zustandsgrößen Druck (p), Volumen (V) und Temperatur (T) ab [Lüdecke und Lüdecke, 2000].

Die innere Energie (U) im Bezugszustand des idealen Gases (U^{id}) ist die volumenunabhängige innere Energie des idealen Gases bei der Bezugstemperatur T_0 : $U(T_0, V_0) \rightarrow U^{id}(T_0)$ und die isochore Wärmekapazität beim Bezugsvolumen kann ersetzt werden durch die isochore Wärmekapazität des idealen Gases: $C_V(T, V_0) \rightarrow C_V^{id}$.

Für das ideale Gas gilt unter Berücksichtigung der Zustandsgleichung des idealen Gases (Gleichung 7.2) die Gleichung 7.3 [Lüdecke und Lüdecke, 2000]. Im vorliegenden Fall wird als Bezugspunkt der absolute Nullpunkt gewählt, demnach entfällt der Term vor dem Integral.

$$p(T, V) = \frac{nRT}{V} \quad (7.2)$$

p	[Pa]	Druck
n	[-]	Teilchenzahl
R	[J/(mol · K)]	allgemeine Gaskonstante
T	[K]	Temperatur
V	[m ³]	Volumen

$$U^{id}(T) = U^{id}(T_0) + \int_{T_0}^T C_V^{id}(T) dT \quad (7.3)$$

Unter realen Bedingungen setzt sich die gesamte innere Energie eines Systems aus den inneren Energien der im System enthaltenen Subsysteme zusammen. Im vorliegenden Fall soll aus Gründen der Vereinfachung lediglich die innere Energie der Gasphase betrachtet werden, in der sich die Zelle nach der Modellvorstellung befindet. Nach Gleichung 7.3 muss hierfür die isochore Wärmekapazität des Wasserdampfs bestimmt werden.

Die gesamte molare Wärmekapazität errechnet sich nach der Gleichung 7.4 [Atkins, 1996; Jitschin, 1999].

$$C_{v,m} = \frac{1}{2} \cdot f \cdot R \quad (7.4)$$

$C_{v,m}$	[J/(mol · K)]	molare Wärmekapazität eines Gases
f	[-]	Anzahl der aktiven Freiheitsgrade
R	[J/(mol · K)]	allgemeine Gaskonstante (8,314472)

Der translatorischen Bewegung eines Moleküls werden $f=3$ Freiheitsgrade zugeschrieben, den Rotationen und Schwingungen weitere Freiheitsgrade [Jitschin, 1999]. Für ein ideales Gas gelten lediglich die translatorischen Freiheitsgrade. Nach dem Einsetzen der allgemeinen Gaskonstante ergibt sich für ein ideales Gas eine isochore Wärmekapazität von 12,471 [J/(mol · K)].

Da es sich bei Wasserdampf – entgegen der ursprünglichen Annahme – nicht um ein ideales Gas handelt, muss die Aktivität der übrigen Freiheitsgrade der Gleichung 7.5 überprüft werden.

$$C_{v,m} = \frac{1}{2}(3 + v_R^* + 2v_S^*)R \quad (7.5)$$

$C_{v,m}$	[J/(mol · K)]	molare isochore Wärmekapazität eines Gases
v_R^*	[-]	Anzahl der aktiven Rotationsfreiheitsgrade
v_S^*	[-]	Anzahl der aktiven Schwingungsfreiheitsgrade
R	[J/(mol · K)]	allgemeine Gaskonstante (8,314472)

Zum Nachweis der Aktivität der drei Rotationsfreiheitsgrade in den hier zu betrachtenden Temperaturbereichen sind die drei charakteristischen Temperaturen zu den Rotationskonstanten zu errechnen. Die Wellenzahlen der Rotationskonstanten für Wasser betragen $27,9 \text{ cm}^{-1}$, $14,5 \text{ cm}^{-1}$ und $9,3 \text{ cm}^{-1}$ [Atkins, 1996]. Die charakteristischen Temperaturen errechnen sich nach der Gleichung 7.6. Es ergeben sich die charakteristischen Temperaturen von 40 K, 21 K und 13 K. Da im vorliegenden Fall Temperaturen $>273,15 \text{ K}$ betrachtet werden, sind die drei Rotationen vollständig aktiv.

$$T_{char.} = \text{Wellenzahl der Rotationskonstante} \cdot \frac{hc}{k} \quad (7.6)$$

$T_{char.}$	[K]	charakteristische Temperatur
h	[Js]	Planksches Wirkungsquantum ($6,6260689 \cdot 10^{-34}$)
c	[cm/s]	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum (299792458 m/s)
k	[J/K]	Boltzmann-Konstante ($1,3806504 \cdot 10^{-23}$)

Auf die gleiche Weise kann die Aktivität der drei Normalschwingungen überprüft werden. Die Wellenzahlen der Normalschwingungen für Wasser betragen $3656,7 \text{ cm}^{-1}$, $1594,8 \text{ cm}^{-1}$ und $3755,8 \text{ cm}^{-1}$ [Atkins, 1996]. Ersetzt man in der Gleichung 7.6 die Wellenzahl der Rotationskonstante durch die Wellenzahlen der Normalschwingungen, so ergeben sich die charakteristischen Temperaturen von 5261 K, 2294 K und 5404 K. Derartig hohe Temperaturen werden im hier behandelten Modellansatz nicht betrachtet. Für die hier vorgenommenen Berechnungen gelten die drei Schwingungen daher als inaktiv.

Für Wasserdampf liefert die Gleichung 7.5 $c_{v,m} = \frac{1}{2}(3 + 3)R$. Nach einsetzen der allgemeinen Gaskonstante ergibt sich für die molare isochore Wärmekapazität ein Wert von $24,94 \text{ J/(mol · K)}$.

Die spezifische isochore Wärmekapazität c_v wird unter Einbeziehung der molaren Masse (M) auf die Masse bezogen (Gleichung 7.7):

$$c_v = \frac{c_{v,m}}{M} \quad (7.7)$$

Mit $M = 18,015 \text{ g/mol}$ für Wasser ergibt sich für c_v ein Wert von $1,385 \text{ J/(g} \cdot \text{K)}$.

Ein ähnlicher Wert ergibt sich für die Berechnung der isochoren Wärmekapazität für Wasser aus der isobaren Wärmekapazität c_p über den Zusammenhang in Gleichung 7.8.

$$c_p = c_v + R \quad (7.8)$$

Die isobare Wärmekapazität von Wasser im thermodynamischen Standardzustand ($T_0=298,15 \text{ K}$, $p_0=100 \text{ kPa}$) beträgt $1,8646 \text{ J/(g} \cdot \text{K)}$ [Baehr, 2009]. Die spezifische Gaskonstante (R_i) beträgt für Wasser mit einer Molmasse (M_i) von $18,015 \text{ g/mol}$ $0,4615 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ (Gleichung 7.9).

$$R_i = \frac{R}{M_i} \quad (7.9)$$

Einsetzen in Gleichung 7.8 ergibt eine spezifische isochore Wärmekapazität von $1,4031 \text{ J/(g} \cdot \text{K)}$. Die Wärmekapazität eines nicht idealen Gases ist keine Konstante und unterliegt temperatur- und druckbedingten Änderungen, die jedoch in den hier betrachteten Bereichen gering sind und aufgrund der starken Vereinfachung der Modellvorstellungen vernachlässigt werden können.

Unter Berücksichtigung des Volumens des Druckbehälters (1 l) kann nach Gleichung 7.2 die Stoffmenge n [mol] für die beiden zu betrachtenden Behandlungsfälle errechnet werden. Für Variante A ergibt sich $n=0,38129 \text{ mol}$, für B ist $n=0,00192 \text{ mol}$. Nach Einbeziehung der spezifischen Molmasse von $18,015 \text{ g/mol}$ ergibt sich für A eine Masse von $6,869 \text{ g}$ und für B von $0,035 \text{ g}$. Mit dem absoluten Nullpunkt als Bezugspunkt ergeben sich unter Verwendung der spezifischen isochoren Wärmekapazität von $1,4031 \text{ J/g} \cdot \text{K}$ und der für die jeweilige Variante gegebenen Behandlungstemperatur nach Gleichung 7.3 die in der Wasserdampfphase enthaltenen inneren Energien (U) Abbildung 7.3.

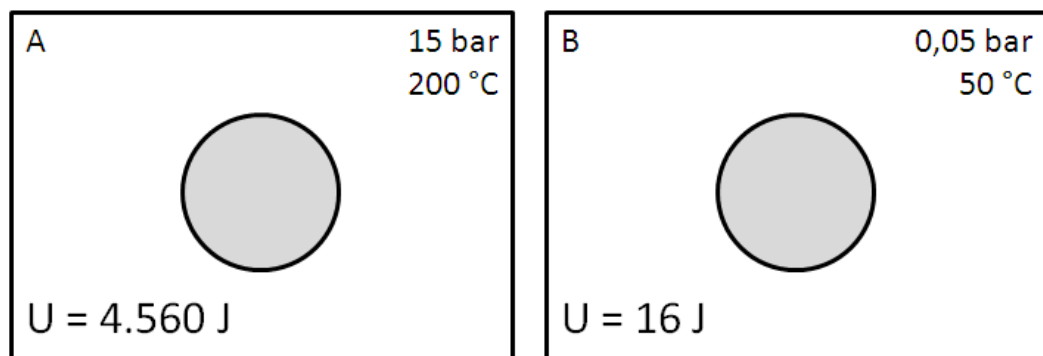


Abbildung 7.3: Modellvorstellung zur Auswirkung der inneren Energie auf die Zell-desintegration (A: Druckbehandlung, B: Vakuumbehandlung)

Es wird deutlich, dass unter den Bedingungen der Thermo-Druck-Behandlung (A) aufgrund der höheren Moleküldichte und der höheren Temperatur ein deutlich höheres Maß an Energie wirkt (ca. um den Faktor 300 höher) als unter den Bedingungen der Vakuum-Siede-Behandlung (B). Es kann daher angenommen werden, dass die vergleichsweise hohe inneren Energie der Thermo-Druck-Behandlung einen Einfluss auf die Desintegrationswirkung des Verfahrens hat, der bei der Vakuum-Siede-Behandlung nur in stark vermindertem Ausmaß wirksam sein wird.

7.3.3 Modellvorstellung zur Auswirkung eines Dampfexplosionsverfahrens

Wie im Kapitel 4.4.3 beschrieben, existieren einige Ansätze, die zusätzlich zur thermischen Behandlung und Druck eine schlagartige Verringerung des Drucks nutzen (Dampfexplosionsverfahren).

Auch für die in der vorliegenden Arbeit untersuchte Vakuum-Siede-Behandlung wurde die Wirksamkeit eines derartigen Effektes angenommen. Weder in den halbertechnischen Versuchen (allmähliche Druckabsenkung, ca. 5 Min.), noch in den labortechnischen Versuchen (schlagartige Druckabsenkung) konnte eine Auswirkung auf den Aufschluss der Organik oder die Gasbildung im Gärversuch festgestellt werden. Die Bedingungen für einen desintegrierenden Einfluss eines Dampfexplosionsverfahrens können anhand der Bedingungen des Modells in Abbildung 7.4 qualitativ beurteilt werden.

Für die Thermo-Druck-Behandlung wurde davon ausgegangen, dass die Zellflüssigkeit (im Modell: Wasser) auf die gleiche Temperatur erwärmt wird, wie der Wasserdampf im Druckbehälter und sich hierdurch aufgrund des temperaturabhängigen

Dampfdrucks ein Zellinnendruck von etwa 15 bar einstellt. Aufgrund der sich entsprechenden Beträge des Zellinnen- und Außendrucks wirkt zum Zeitpunkt A keine druckabhängige Kraft auf die Zellwand. Für die Vakuum-Siede-Behandlung wurde für den Zeitpunkt B – wie in den Versuchen – eine Vorerwärmung auf 90 °C angenommen. Im Zellinneren herrscht der Turgor von 5 bar.

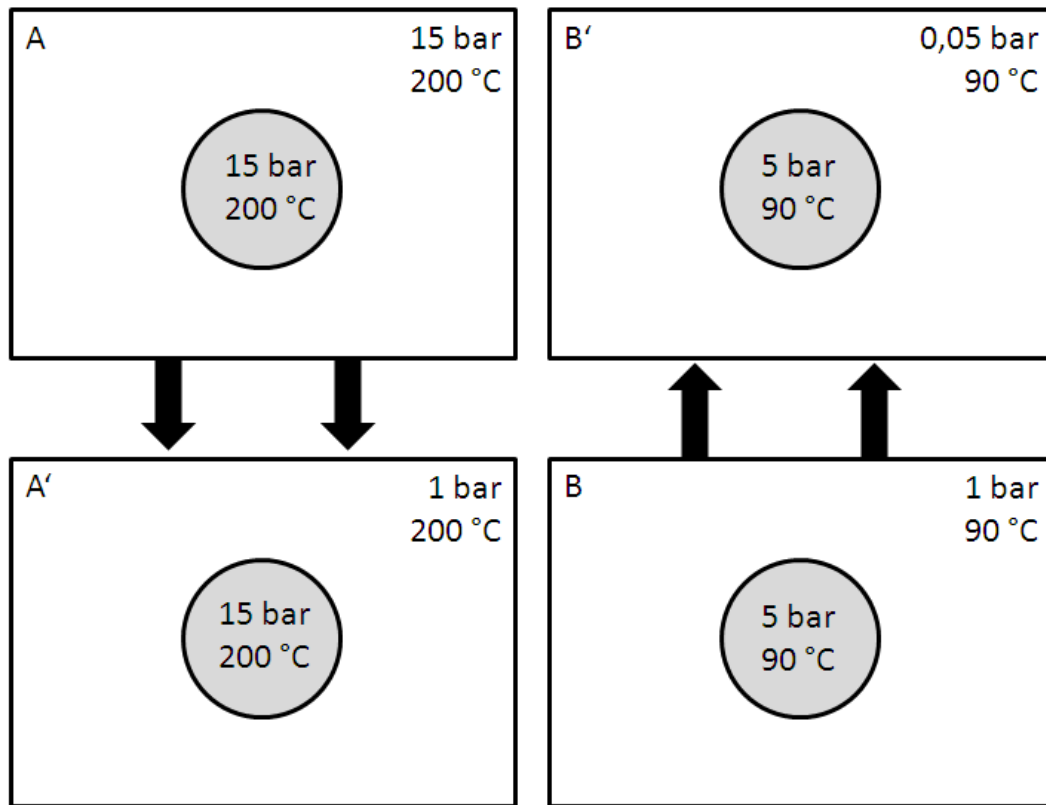


Abbildung 7.4: Modellvorstellung zur Auswirkung eines Dampfexplosionsverfahrens auf die Zelldesintegration (A: Druckbehandlung, B: Vakuumbehandlung)

Wird in der Druckbehandlung schlagartig der Zustand A' eingestellt, so kommt es zu einer sofortigen Verdampfung des freien flüssigen Wassers im System, da der Druck des Wasserdampfes bzw. des Gesamtsystems mit ca. 15 bar weit über dem Sättigungsdampfdruck unter Normalbedingungen liegt.

Der Sättigungsdampfdruck bei einem bestimmten Luftdruck kann näherungsweise über die Clausius-Clapyron-Gleichung errechnet werden (Gleichung 7.10).

$$\frac{dp_s}{dT} = \frac{\Delta h}{\Delta v} \cdot \frac{1}{T} \quad (7.10)$$

p_s	[Pa]	Sättigungsdampfdruck
T	[K]	Temperatur
Δh	[J/kg]	Zunahme der spezifischen Verdampfungsenthalpie
Δv	[m ³ /kg]	Zunahme des spezifischen Volumens

Die Gleichung kann unter der Annahme integriert werden, dass das spezifische Stoffvolumen im gasförmigen Zustand

$$v = R_s \cdot \frac{T}{p_s} \quad (7.11)$$

beträgt ($R_s :=$ spezifische Gaskonstante [J/(kg · K)]) und im festen bzw. flüssigen Zustand vernachlässigbar gering ist. Die Umwandlungsenthalpie Δh ist unabhängig von der Temperatur [Jitschin, 1999]. Wählt man als Bezugspunkt den Siedepunkt unter Normaldruckbedingungen T_{1013} , so erhält man Gleichung 7.12.

$$\ln \frac{p_s}{p_n} = \frac{\Delta h}{R_s} \cdot \frac{1}{T_{1013}} - \frac{\Delta h}{R_s} \cdot \frac{1}{T} \quad (7.12)$$

p_n	[Pa]	Normaldruck
T_{1013}	[K]	Temperatur bei der $p_s = p_n$ ist

Für die angenommene Temperatur der Temperatur-Druck-Behandlung von 200 °C ergibt sich hiernach ein Dampfdruck von 16,2 bar ($\Delta h = 2.260$ kJ/kg, $R_s = 462$ J/(kg · K), $p_n = 1013$ bar, $T_{1013} = 373,15$ K).

Eine Berechnung mittels einer von Wagner [1973] entwickelten Dampfdruckgleichung, die Messwerte des Dampfdrucks im gesamten Temperaturbereich zwischen dem Tripelpunkt und dem kritischen Punkt sehr genau abbildet, ergibt einen Dampfdruck von 15,55 bar und zeigt, dass die Berechnungen nach Gleichung 7.12 für den vorliegenden Fall eine hinreichende Genauigkeit aufweist. Als Koeffizienten und Exponenten wurden die bei Baehr [2009] angegebenen Werte für Wasser genutzt.

Aufgrund der ebenfalls hohen Temperatur der Zellflüssigkeit in der Situation A' (200 °C) ist auch diese Flüssigkeit bestrebt zu verdampfen. Ist die Zellwand in der Lage dem entstehenden Dampfdruck von 15,55 bar standzuhalten, bleibt sie intakt, andernfalls wird sie reißen und die zelluläre Substanz freisetzen.

Nach Gleichung 7.1 ergibt sich für diesen Innendruck und einem Außendruck von 1 bar eine spezifische Kraft von $145,5 \text{ N/cm}^2$ bzw. bezogen auf die Oberfläche der Zellwand eine Kraft von $0,0457 \text{ N}$, der das Elastizitätsmodul ϵ der Zellwand standhalten muss.

Wie im Kapitel 3.2.3 erläutert, sind pflanzliche Zellen durchaus in der Lage derartigen Drücken standzuhalten. Im Falle einer vorherigen druckthermischen Behandlung (vgl. Kapitel 7.3.2) ist es jedoch wahrscheinlich, dass die Zellwand an Stabilität und Widerstandsfähigkeit verloren hat, dem Innendruck nachgibt und reißt (vgl. Kapitel 4.4.3).

Für den Fall der Vakuum-Siede-Behandlung ist ein derartiger Effekt nicht zu erwarten, da die Zellflüssigkeit aufgrund des Turgors zu keinem Zeitpunkt der Behandlung das Bestreben hat zu verdampfen. Hierfür müsste die Temperatur auf mindestens $150 \text{ }^\circ\text{C}$ ansteigen (Siedetemperatur bei 5 bar nach Gleichung 7.12).

In den verwendeten Modellvorstellungen wurde die Auswirkung auf pflanzliche Zellen betrachtet. Wie in den Kapiteln 3.2.1 und 3.2.2 beschrieben, beeinflussen unter realen Bedingungen auch cellulosehaltige und zum Teil ligninikrustrierte Strukturen die Abbaubarkeit organischer Substrate. Ein Einfluss einer schlagartigen Verdampfung in organischen Fasern gebundenen Wassers auf das Aufbrechen dieser Strukturen kann theoretisch für beide Behandlungsvarianten angenommen werden (vgl. Kapitel 4.4.3). Aufgrund des größeren Druckunterschiedes sowie der im großtechnischen Maßstab schnelleren Druckverringerung sind für das Hochruckverfahren stärkere desintegrierende Effekte zu erwarten als für das Vakuum-Verfahren, bei dem der Druck durch eine Pumpe über ein vom genutzten Aggregat abhängiges Zeitintervall abgesenkt werden muss. Ein entsprechend großer „Vorlagebehälter“ für eine schlagartige Absenkung auf Vakuum-Bedingungen – wie sie in den labortechnischen Versuchen umgesetzt wurde – ist großtechnisch als unrealistisch einzustufen.

7.4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Nach den vorliegenden Versuchsergebnissen ist das Verfahren der Vakuum-Siede-Behandlung im Sinne der bearbeiteten Fragestellungen nicht geeignet zu einem erhöhten Aufschluss und in dessen Folge zu erhöhten Gasbildungsraten beizutragen und muss nach dem jetzigen Kenntnisstand als ungeeignet eingestuft werden. Die für das Verfahren zusätzlich aufzubringenden energetischen und betriebstechnischen Zusatzaufwendungen sind auf Grundlage der Forschungsergebnisse nicht zu rechtfertigen.

Es besteht jedoch weiterhin ein Bedarf an energieeffizienten Vorbehandlungs- und Aufschlussverfahren vor der Vergärung organischer Roh- und Reststoffe zur Erhöhung der Nettoenergieausbeuten.

Einer reinen Druck- oder Unterdruckbehandlung kann auf Basis der im Kapitel 3.2.3 dargelegten Zusammenhänge und der Ergebnisse aus den Modellvorstellungen zur auf die Zellwand wirkenden Kraft in Folge von Druckänderungen keine Wirksamkeit attestiert werden (vgl. Kapitel 7.3.1).

Der Modellvorstellung aus Kapitel 7.3.2 folgend, ist anzunehmen, dass im Verlauf einer thermischen Behandlung bei hohen Temperaturen und hierfür benötigten hohen Drücken durchaus ein Aufschluss organischer Substrate zu erwarten ist. Dies belegen auch die im Kapitel 4.4.3 benannten Forschungsergebnisse aus der Literatur.

Es ist jedoch evident, dass unterschiedliche organische Substrate unterschiedlich hohe Temperaturen und damit Energiegehalte im Behandlungssystem benötigen, um einen Aufschluss zu erfahren, der für eine signifikante Erhöhung der anaeroben Verfügbarkeit notwendig ist. Diese Schwelle kann durch die Vakuum-Siede-Behandlung offenbar nicht erreicht werden.

Ab welcher inneren Energie des Gesamtsystems (bestehend aus fester, flüssiger und gasförmiger Phase) ein Aufschluss für definierte Stoffgruppen erreichbar ist, könnte Gegenstand zukünftiger Forschungsarbeiten sein. Ergebnisse zu dieser Fragestellung könnten die Einschätzung unterschiedlichster Behandlungsverfahren hinsichtlich ihrer Eignung für definierte Stoff- oder Substratgruppen sowie deren potenzieller Energieeffizienz maßgeblich erleichtern. Ähnliche Fragestellungen lassen sich aus der Modellvorstellung zum Wirkungsmechanismus der Dampfexplosionsverfahren ableiten.

Besondere Relevanz erhalten Untersuchungen dieser Art, wenn sie dazu beitragen können, die auf vielen Anlagenstandorten zur Verfügung stehende Abwärme für eine effektive Konditionierung organischer Substrate zu nutzen, um damit einen Beitrag zur Nutzung erneuerbarer Energieträger zu leisten.

Literaturverzeichnis

- [Ademark et al. 1998] ADEMARK, P. ; VARGA, A. ; MEDVE, J. ; HARPUNPÄÄ, V. ; TORBJÖRN D. ; TJERNELD, F. ; STALBRAND, H.: Softwood hemicellulose-degrading enzymes from *Aspergillus niger*: Purification and properties of a [beta]-mannanase. In: *Journal of Biotechnology* 63 (1998), Nr. 3, S. 199–210. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6T3C-3TXSPVW-4/2/1fdf13e720b5f8e04b636dff47d73d18>. – ISSN 0168-1656
- [Ahn und Forster 2002] AHN, J. H. ; FORSTER, C. F.: A comparison of mesophilic and thermophilic anaerobic upflow filters treating paper-pulp-liquors. In: *Process Biochemistry* 38 (2002), Nr. 2, S. 256–261. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6THB-45NGJK3-1/2/2883ddfef6e234a8499e93c80d4842fd>. – ISSN 1359-5113
- [Amon 2006] AMON, T. ; VERKEHR, Innovation und T. Bundesministerium für (Hrsg.): *Optimierung der Methanerzeugung aus Energiepflanzen mit dem Methanenergiewertsystem*. 2006
- [Amon und Döhler 2006] AMON, T. ; DÖHLER, H.: Qualität und Verwertung des Gärrestes. In: FNR (Hrsg.): *Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung*. Gülzow : Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2006, S. 153–165. – ISBN 3000143335
- [Amon et al. 2005] AMON, T. ; KRYVORUCHKO, V. ; BODIROZA, V. ; AMON, B.: *Das Methanbildungsvermögen und die Biogasqualität bei der Vergärung von Energiepflanzen: Forschungsbericht: im Auftrag von SAATBAU LINZ Gen.m.b.H.* 2005. – URL http://www.saatbaulinz.at/downloads/Biogas-Studie-Boku_2005.pdf
- [Ando et al. 1988] ANDO, S. ; KAKIMOTO, T. ; ITOH, K. ; ARAI, I. ; KIYOTO, K. ; HANAI, S.: Increased digestibility of cedar by pretreatment with peracetic acid and steam explosion. In: *Biotechnol. Bioeng.* 31 (1988), Nr. 8, S. 802–804. – URL <http://dx.doi.org/10.1002/bit.260310807>

- [Anonym 1998] ANONYM: Physicochemical Structure of The Starch Granule. In: SIVAK, M. N. AND JACK PREISS, J. (Hrsg.): *Advances in Food and Nutrition Research* Bd. Volume 41. Academic Press, 1998, S. 13–32. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B7CT6-4S8V85Y-7/2/35d3461523779e168f35bf1872aeb4ac>. – ISBN 1043-4526
- [Aretz und Hirschl 2007] ARETZ, A. ; HIRSCHL, B. ; DENDROM KOORDINATIONSBÜRO (Hrsg.): *Biomassepotenziale in Deutschland - Übersicht maßgeblicher Studienergebnisse und Gegenüberstellungen der Methoden: DENDROM Diskussionspapier Nr. 1, Studie im Rahmen des Verbundprojektes DENDROM - Zukunftsrohstoffe Dendromasse*. 2007. – URL http://www.dendrom.de/daten/downloads/Diskussionspapier_Potenzialanalyse_I%C3%96W.pdf. – Zugriffsdatum: 25.08.2009
- [Atkins 1996] ATKINS, P. W.: *Physikalische Chemie*. 2. Aufl. Weinheim : VCH, 1996. – ISBN 3-527-29275-6
- [ATV 1990] ATV: Anaerobe Verfahren zur Behandlung von Industrieabwässern: Arbeitsbericht des ATV Fachausschusses 7.5 "Anaerobe Verfahren zur Behandlung von Industrieabwässern". In: *KA-Abwasser, Abfall* 37 (1990), Nr. 10/90, S. 1247–1251
- [ATV 1993] ATV: Technologische Beurteilungskriterien zur anaeroben Abwasserbehandlung: 2. Arbeitsbericht des ATV-Fachausschusses 7.5 "Anaerobe Verfahren zur Behandlung von Industrieabwässern". In: *Korrespondenz Abwasser, KA-Abwasser, Abfall* 40 (1993), Nr. 2/93, S. 217–223
- [ATV 1994] ATV: Geschwindigkeitsbestimmende Schritte beim anaeroben Abbau von organischen Verbindungen in Abwässern: 3. Arbeitsbericht des ATV-Fachausschusses 7.5 "Anaerobe Verfahren zur Behandlung von Industrieabwässern". In: *Korrespondenz Abwasser, KA-Abwasser, Abfall* 41 (1994), Nr. 1, S. 101–107
- [ATV-DVWK 2000] ATV-DVWK: Verfahren und Anwendungsgebiet der mechanischen Klärschlammintegration: 1. Arbeitsbericht der Arbeitsgruppe AK-1.6 "Klärschlammintegration". In: *Korrespondenz Abwasser, KA-Abwasser, Abfall* 47 (2000), Nr. 4, S. 570–576. – URL <http://www.klaerschlammdesintegration.de/Bericht1.pdf>. – Zugriffsdatum: 05.08.2009

- [ATV-DVWK 2003a] ATV-DVWK: *Technische Rahmenbedingungen für die Vergärung biogener Anfälle*. Mai 2003. Hennef : ATV-DVWK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall e.V., 2003. – ISBN 392406346X
- [ATV-DVWK 2003b] ATV-DVWK: Thermische, chemische und biochemische Desintegrationsverfahren: 3. Arbeitsbericht der Arbeitsgruppe AK-1.6 "Klärschlamm-desintegration". In: *Korrespondenz Abwasser, KA-Abwasser, Abfall* (2003), Nr. 06, S. 796–804
- [Avila 2008] AVILA, A. K.: *Vakuum-Siede-Behandlung zur Trocknung fester Abfallstoffe und Maissilage*. Braunschweig, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2008
- [Baaden 2003] BAADEN, A. H. W.: *Mechanische Beanspruchung pflanzlicher organischer Materialien*. Braunschweig, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2003
- [Baehr 2009] BAEHR, H. D.: *Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendungen*. 14. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. – ISBN 978-3-642-00556-5
- [Barjenbruch et al. 2001] BARJENBRUCH, M. ; KOPLOW, O. ; BOMBA, I.: Enzymatische, mechanische und thermische Vorbehandlung von Überschussschlamm zur Minderung des Schäumens im Faulbehälter. In: *GWF, Wasser und Abwasser* 142 (2001), Nr. 12, S. 814–816
- [Baumann 2010] BAUMANN, T.: *Prozentualer Wärmenedarf eines Fermenters von der Abwärme des zugehörigen BHKW: Telefonische Auskunft von T. Baumann von der STRABAG Umwelтанlagen GmbH, 06.12.2010*. 2010
- [BEE 2009] BEE ; BUNDESVERBAND ERNEUERBARE ENERGIE E.V. (Hrsg.): *Stromversorgung 2020 - Wege in eine moderne Energiewirtschaft: Strom-Ausbauprognose der Erneuerbaren-Energien-Branche*. 2009. – URL http://www.fvee.de/fileadmin/politik/09.01_Branchenprognose2020_Langfassung.pdf. – Zugriffsdatum: 10.12.2010
- [Bekker 2007] BEKKER, M.: *Charakterisierung der anaeroben Abbaubarkeit von spezifischen organischen Stoffen: Schriftenreihe SWW - Band 125*. Karlsruhe, Universität Karlsruhe, Dissertation, 2007

- [Benkert et al. 1997] BENKERT, R. ; OBERMEYER, G. ; BENTRUP, F. W.: The turgor pressure of growing lily pollen tubes. In: *Protoplasma* 198 (1997), Nr. 1-2, S. 1–8. – URL [\url{http://www.springerlink.com/content/k51420133201514t/}](http://www.springerlink.com/content/k51420133201514t/)
- [BMU 2009] BMU ; UMWELT, Naturschutz und Reaktorsicherheit (. Bundesministerium für (Hrsg.): *Erneuerbare Energien in Zahlen - nationale und internationale Entwicklung*. 2009. – URL [\url{http://www.bmu.de/files/erneuerbare_energien/downloads/application/pdf/broschuere_ee_zahlen.pdf}](http://www.bmu.de/files/erneuerbare_energien/downloads/application/pdf/broschuere_ee_zahlen.pdf). – Zugriffsdatum: 22.08.2009
- [Borja et al. 1998] BORJA, R. ; ALBA, J. ; MANCHA, A. ; MARTÍN, A. ; ALONSO, V. ; SÁNCHEZ, E.: Comparative effect of different aerobic pretreatments on the kinetics and macroenergetic parameters of anaerobic digestion of olive mill wastewater in continuous mode. In: *Bioprocess and Biosystems Engineering* 18 (1998), Nr. 2, S. 127–134. – URL [\url{http://www.springerlink.com/content/q657td9vc6mqxf7q/}](http://www.springerlink.com/content/q657td9vc6mqxf7q/)
- [Bougrier et al. 2007] BOUGRIER, C. ; DELGENÈS, J. P. ; CARRÈRE, H.: Impacts of thermal pre-treatments on the semi-continuous anaerobic digestion of waste activated sludge. In: *Biochemical Engineering Journal* 34 (2007), Nr. 1, S. 20–27. – URL [\url{http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V5N-4MCDK1Y-3/2/38b0f92bf2e7d3e45704a5a4f69f3ae4}](http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V5N-4MCDK1Y-3/2/38b0f92bf2e7d3e45704a5a4f69f3ae4). – ISSN 1369-703X
- [Boussaid et al. 1999] BOUSSAID, A. ; ROBINSON, J. ; CAI, Y. ; GREGG, D. J. ; SADDLER, J. N.: Fermentability of the hemicellulose-derived sugars from steam-exploded softwood (douglas fir). In: *Biotechnology and Bioengineering* 64 (1999), Nr. 3, S. 284–289. – URL [\url{http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0290\(19990805\)64:3<284::AID-BIT4>3.0.CO;2-C}](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1097-0290(19990805)64:3<284::AID-BIT4>3.0.CO;2-C). – ISSN 1097-0290
- [Brune und Götz 1992] BRUNE, K. A. ; GÖTZ, F.: Degradation of Lipids by Bacterial Lipases. In: WINKELMANN, G. (Hrsg.): *Microbial degradation of natural products*. Weinheim : VCH, 1992, S. 244–267. – ISBN 1560811692
- [Büchner et al. 1981] BÜCHNER, K. H. ; ZIMMERMANN, U. ; BENTRUP, F. W.: Turgor pressure and water transport properties of suspension-cultured cells of *Chenopodium rubrum* L. In: *Planta* 151 (1981), Nr. 1, S. 95–102. – URL [\url{http://www.springerlink.com/content/wg135476n80h2002/}](http://www.springerlink.com/content/wg135476n80h2002/)
- [Bunge 1992] BUNGE, F.: *Mechanischer Zellaufschluß in Rührwerkskugelmöhlen*. Braunschweig, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 1992

- [Busch und Sieber 2006] BUSCH, G. ; SIEBER, M.: Zweistufiges Fest-Flüssig-Biogasverfahren mit offener Hydrolyse – ein neues technologisches Konzept für die Biogasgewinnung aus nachwachsenden Rohstoffen und bioverfügbaren Abfällen. In: *Forum der Forschung* (2006), Nr. 19, S. 63–68. – URL http://www-docs.tu-cottbus.de/pressestelle/public/Forum_der_Forschung/Heft_19/063-068_LSAfallwirtschaft.pdf
- [Chandra et al. 2007] CHANDRA, R. ; BURA, R. ; MABEE, W.: Substrate üpretreatment : The key to effective enzymatic hydrolysis of lignocellulosics? In: OLSSON, L. (Hrsg.) ; AHRING, B. K. (Hrsg.): *Biofuels* Bd. 108. Berlin : Springer, 2007, S. 67–93. – ISBN 9783540736509
- [Chiu et al. 1997] CHIU, Y. C. ; CHANG, C. N. ; LIN, J. G. ; HUANG, S. J.: Alkaline and ultrasonic pretreatment of sludge before anaerobic digestion. In: *Water Science & Technology* 36 (1997), Nr. 11, S. 155–162. – URL <http://lequia.udg.es/lequianet/WatSciTech/03611/0155/036110155.pdf>
- [Daughtry et al. 1978] DAUGHTRY, C. S. T. ; HOLT, D. A. ; LECHTENBERG, V. L.: Concentration, Composition, and in vitro Disappearance of Hemicellulose in Tall Fescue and Orchardgrass. In: *Agron J* 70 (1978), Nr. 4, S. 550–554. – URL <http://agron.scijournals.org/cgi/content/abstract/agrojn1;70/4/550>
- [DESTATIS 2009] DESTATIS ; STATISTISCHES BUNDESAMT (Hrsg.): *Umwelt - Abfallentsorgung 2007 - Fachserie 19 Reihe 1*. 2009. – URL <https://www-ec.destatis.de/csp/shop/sfg/bpm.html.cms.cBroker.cls?cmspa>. – Zugriffsdatum: 21.10.2009
- [Dhouib et al. 2006] DHOUIB, A. ; ELLOUZ, M. ; ALOUI, F. ; SAYADI, S.: Effect of bioaugmentation of activated sludge with white-rot fungi on olive mill wastewater detoxification. In: *Letters in Applied Microbiology* 42 (2006), Nr. 4, S. 405–411. – URL <http://dx.doi.org/10.1111/j.1472-765X.2006.01858.x>. – ISSN 1472-765X
- [DIN 38402-30 1998] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser und Schlammuntersuchung - Allgemeine Angaben (Gruppe A) - Teil 30: Vorbehandlung, Homogenisierung und Teilung heterogener Wasserproben*. Juli 1998
- [DIN 38404-5 2009] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Physikalische*

und physikalisch-chemische Kenngrößen (Gruppe C) - Teil 5: Bestimmung des pH-Werts (C 5). Juli 2009

[DIN 38409 Teil 1 1987] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen (Gruppe H), Bestimmung des Gesamttrockenrückstandes, des Filtratrückstandes und des Glührückstandes (H 1)*. Januar 1987

[DIN 38409 Teil 41 1980] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen (Gruppe H), Bestimmung des Chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB) im Bereich über 15 mg/l (H 41)*. Dezember 1980

[DIN 38414 Teil 4 1984] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *Schlamm und Sedimente (Gruppe S), Bestimmbarkeit der Eluierbarkeit mit Wasser (S4)*. Oktober 1984

[DIN EN 13137 2001] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *Charakterisierung von Abfall - Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) in Abfall, Schlämmen und Sedimenten*. Dezember 2001

[DIN EN 1484 1997] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *Anleitung zur Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) und des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC)*. Dezember 1997

[DIN EN 932-1 1996] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *Prüfverfahren für allgemeine Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Probenahmeverfahren*. November 1996

[DLG 1997] DLG ; UNIVERSITÄT HOHENHEIM (Hrsg.): *DLG - Futterwerttabelle: Wiederkäuer*. 1997

[Edelmann 2001] EDELMANN, W.: Biogaserzeugung und Nutzung. In: KALTSCHMITT, M. (Hrsg.) ; HARTMANN, H. (Hrsg.): *Energie aus Biomasse*. Berlin : Springer, 2001, S. 641–694. – ISBN 3540648534

[Eder 2005] EDER, B.: Großtechnische Erfahrungen mit der Ultraschallbehandlung von Klärschlämmen. In: NEIS, U. (Hrsg.): *Ultraschall in der Umwelttechnik III* Bd. 50. Hamburg, 2005, S. 139–150. – ISBN 3-930400-69-3

[Eder und Günthert 2003] EDER, B. ; GÜNTHERT, W.: Klärschlammminimierung durch Zellaufschluss mit Ultraschall. In: *Korrespondenz Abwasser, KA-Abwasser, Abfall* 50 (2003), Nr. 3, S. 333–342

- [Eikmanns und Eikmanns 2001] EIKMANN, M. ; EIKMANN, B.: Einfluss von Mikroorganismen auf Natur und Mensch. In: MUNK, K. (Hrsg.): *Grundstudium Biologie*. Heidelberg, Berlin : Spektrum Akad. Verl., 2001, S. 11–1 – 11–26. – ISBN 3827407958
- [Elbing und Dünnebeil 1999] ELBING, G. ; DÜNNEBEIL, A.: Thermischer Zellaufschluss mit anschließender Faulung - Labortuntersuchungen. In: *Korrespondenz Abwasser, KA-Abwasser, Abfall* 46 (1999), Nr. 4, S. 538–547
- [Fan et al. 1980] FAN, L. T. ; LEE, Y. H. ; BEARDMORE, D. H.: Mechanism of the enzymatic hydrolysis of cellulose: Effects of major structural features of cellulose on enzymatic hydrolysis. In: *Biotechnology and Bioengineering* 22 (1980), Nr. 1, S. 177–199. – URL <http://dx.doi.org/10.1002/bit.260220113>. – ISSN 1097-0290
- [Fischer et al. 2001] FISCHER, J. L. ; ALBRECHT, A. ; KÄMPFER, P.: Mikrobiologie der Kompostierung von Abfällen. In: KÄMPFER, P. (Hrsg.) ; WEISSENFELS, W. D. (Hrsg.): *Biologische Behandlung organischer Abfälle*. Berlin : Springer, 2001, S. 3–43. – ISBN 35404191526990
- [Fischer 2006] FISCHER, N.: *Effizienznachweis und Effizienzvergleich zwischen Vorbehandlungsprozessen für feste biogene Abfallstoffe im Rahmen der Anaerobvergärung*. 2006. – unveröffentlichte Studienarbeit, Leichtweiß-Institut, Abt. Abfall- und Ressourcenwirtschaft, Technische Universität Braunschweig
- [FNR 2006] FNR (Hrsg.): *Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung*. 3. überarb. Aufl. Gülzow : Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2006. – ISBN 3000143335
- [Fricke et al. 2010] FRICKE, K. ; BAHR, T. ; BIDLINGMAIER, W. ; TURK, T.: Energieeffizienz der stofflichen und energetischen Verwertung ausgewählter Abfallfraktionen. In: *Müll und Abfall* 42 (2010), Nr. 2, S. 63–68. – URL http://www.muellundabfall.de/aid/mua_20100204/_sid/WSKD-529659-cqBG/detail.html
- [Fricke et al. 2007a] FRICKE, K. ; HAKE, J. ; HÜTTNER, A. ; MÜLLER, W. ; WALLMANN, R. ; TURK, T.: Technische Einrichtungen für Anlagen der mechanisch-biologischen Restabfallbehandlung. In: HÖSEL, G. (Hrsg.): *Müllhandbuch*. Berlin : Schmidt, 2007, S. A5615. – ISBN 9783503097784
- [Fricke et al. 2005] FRICKE, K. ; HÜTTNER, A. ; BIDLINGMAIER, W.: Vergärung von Bio- und Restabfällen. In: BISCHOFBERGER, W. (Hrsg.) ; BÖHNKE, B.

- (Hrsg.) ; BSDOK, J. (Hrsg.) ; DICHTL, N. (Hrsg.) ; ROSENWINKEL, K. H. (Hrsg.) ; SCHRÖTER, T. (Hrsg.) ; SEYFRIED, C. F. (Hrsg.): *Anaerobtechnik*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005 (Springer-11777 /Dig. Serial]), S. 565–653. – ISBN 9783540265931
- [Fricke et al. 2002] FRICKE, K. ; NIESAR, M. ; EINZMANN, U. ; MÜLLER, W. ; TURK, T.: Abfallmengen und -qualitäten für biologische Verwertungs- und Behandlungsverfahren. In: LOLL, U. (Hrsg.): *Mechanische und biologische Verfahren der Abfallbehandlung* Bd. ... Berlin : Ernst & Sohn, 2002. – ISBN 3433014701
- [Fricke et al. 2007b] FRICKE, K. ; SANTEN, H. ; BAHR, T. ; HÜTTNER, A.: Status Quo und Entwicklungspotential der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung - mit besonderer Berücksichtigung der Vergärung und der energetischen Verwertung. In: VDI (Hrsg.): *Biogas 2007*. Düsseldorf : VDI-Verl., 2007, S. 14 Seiten. – ISBN 978-3-18-091983-6
- [Fricke et al. 2006] FRICKE, K. ; SANTEN, H. ; DICHTL, N. ; NIEDERSÄCHSISCHEN UMWELTMINISTERIUMS (Hrsg.): *Prozesswasser bei der MBA mit integrierter Vergärungsstufe: MBA-Workshop des Niedersächsischen Umweltministeriums am 06.09.2006*. 2006. – URL http://www.umwelt.niedersachsen.de/live/live.php?navigation_id=2347&article_id=8020&psmand=10
- [Füleky und Czinkota 1993] FÜLEKY, G. ; CZINKOTA, I.: Hot water percolation (HWP): A new rapid soil extraction method. In: *Plant and Soil* 157 (1993), Nr. 1, S. 131–135. – URL <http://www.springerlink.com/content/x144254227u10770/fulltext.pdf>
- [Gallert und Winter 1997] GALLERT, C. ; WINTER, J.: Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of source-sorted organic wastes: effect of ammonia on glucose degradation and methane production. In: *Applied Microbiology and Biotechnology* 48 (1997), Nr. 3, S. 405–410. – URL <http://www.springerlink.com/content/x9r3dndvbb944fk3/>
- [Gannoun et al. 2009] GANNOUN, H. ; BOUALLAGUI, H. ; OKBI, A. ; SAYADI, S. ; HAMDI, M.: Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of biologically pretreated abattoir wastewaters in an upflow anaerobic filter. In: *Journal of Hazardous Materials* 170 (2009), Nr. 1, S. 263–271. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TGF-4W6YJ90-1/2/b4285db4637efa38e018470c50a526ff>. – ISSN 0304-3894

- [Gerhardt et al. 2007] GERHARDT, M. ; PELENC, V. ; BÄUML, M.: Application of hydrolytic enzymes in the agricultural biogas production: Results from practical applications in Germany. In: *Biotechnology Journal* 2 (2007), Nr. 12, S. 1481–1484. – URL <http://dx.doi.org/10.1002/biot.200700220>. – ISSN 1860-7314
- [Gharpuray et al. 1983] GHARPURAY, M. M. ; LEE, Y. H. ; FAN, L. T.: Structural modification of lignocellulosics by pretreatments to enhance enzymatic hydrolysis. In: *Biotechnology and Bioengineering* 25 (1983), Nr. 1, S. 157–172. – URL <http://dx.doi.org/10.1002/bit.260250113>. – ISSN 1097-0290
- [Gutzwiller 2009] GUTZWILLER, S.: *Abwärmenutzung in landwirtschaftlichen Biogasanlagen: Schlussbericht: Im Auftrag des Bundesamt für Energie - Schweiz.* 2009. – URL http://www.biomassenergie.ch/Portals/0/1_de/03_Wie_nutzen/Pdf/2009_BFE_Abw%C3%A4rmenutzung%20in%20landw%20Biogasanlagen.pdf
- [Hamelinck et al. 2003] HAMELINCK, C. N. ; HOOIJDONK VAN, G. ; FAAIJ, A. P. C. ; UTRECHT UNIVERSITY (Hrsg.): *Prospects for ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance as development progresses.* 2003. – URL https://www.senternovem.nl/mmfiles/149043_tcm24-280055.pdf
- [Hartmann 1992] HARTMANN, L.: *Biologische Abwasserreinigung.* Berlin : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1992
- [Heinz et al. 1998] HEINZ, V. ; KNORR, D. ; SCHLÜTER, O.: Hochdruckbehandlung von Lebensmitteln. In: *Spektrum der Wissenschaft* (1998), Nr. 11, S. 132
- [Herfellner und Bochmann 2006] HERFELLNER, T. ; BOCHMANN, G. Meyer-Pittroff R.: Wirtschaftlich sinnvolle Verfahren? Die Verwertung von Biertrebern - derzeitiger Stand und neue Ansätze zur energetischen Nutzung. In: *Brau Industrie* (2006), Nr. 8, S. 42–45. – URL http://fzarchiv.de/Zeitschriftenarchiv/Getraenke-Fachzeitschriften/Brauindustrie/2006/08_06/BI_08-06_42-45_Wirtschaftlich_sinnvolle_Verfahren.pdf?kein=rewrite. – Zugriffsdatum: 18.08.2009
- [Hirst et al. 1959] HIRST, E. L. ; MACKENZIE, D. J. ; WYLAM, C. B.: Analytical studies on the carbohydrates of grasses and clovers. IX - Changes in carbohydrate composition during the growth of lucerne. In: *Journal of the Science of Food and Agriculture* 10 (1959), Nr. 1, S. 19–26. – URL <http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.2740100103>. – ISSN 1097-0010

- [Hüsken et al. 1978] HÜSKEN, D. ; STEUDLE, E. ; ZIMMERMANN, U.: Pressure Probe Technique for Measuring Water Relations of Cells in Higher Plants. In: *Plant Physiol.* 61 (1978), Nr. 2, S. 158–163. – URL <http://www.plantphysiol.org/cgi/content/abstract/61/2/158>
- [Irakin 2009] IRAKIN, F.: *Untersuchungen zur Effizienzsteigerung des anaeroben Abbaus von Biomasse sowie der Erhöhung der Gasausbeute durch eine Vakuum-Siede-Behandlung*. Braunschweig, Technische Universität Braunschweig, Diplomarbeit, 2009
- [Islam und Weil 1998] ISLAM, K. R. ; WEIL, R. R.: Microwave irradiation of soil for routine measurement of microbial biomass carbon. In: *Biology and Fertility of Soils* 27 (1998), Nr. 4, S. 408–416. – URL <http://www.springerlink.com/content/ecfkd546qwjkfuup/>
- [Jacobs 2009] JACOBS, W.: *Entwicklung einer anaeroben Versuchsanlage im Batch-Ansatz zur Untersuchung der Gasbildungsrate unterschiedlicher Modellsubstrate im Vergleich zu kommunalen Bioabfällen*. Braunschweig, Technische Universität Braunschweig, Diplomarbeit, 2009
- [Jahnke 2000] JAHNKE, S.: Mechanischer Nasszellenaufschluss mit Hochdruckhomogenisatoren. In: *Firmenschrift Niro Soavi Deutschland* (2000). – URL [http://www.niro-soavi.de/soavide/cmsresources.nsf/filenames/Nasszellaufschluss.pdf/\\$file/Nasszellaufschluss.pdf](http://www.niro-soavi.de/soavide/cmsresources.nsf/filenames/Nasszellaufschluss.pdf/$file/Nasszellaufschluss.pdf). – Zugriffsdatum: 19.01.2010
- [Jayme und Knolle 1964] JAYME, G. ; KNOLLE, H.: Beitrag zur empirischen röntgenographischen Bestimmung des Kristallinitätsgrades cellulosehaltiger Stoffe. In: *Das Papier* (1964), Nr. 18, S. 249–255
- [Jitschin 1999] JITSCHIN, W. (Hrsg.): *Vakuum-Lexikon: Begriffe, Formeln, Daten und mehr*. Weinheim : Wiley-VCH, 1999 (Vakuum in Forschung und Praxis)
- [Joss 1999] JOSS, A.: *Mikroaerobe Vorbehandlung biogener Abfälle*. Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Dissertation, 1999. – URL <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/eserv/eth:23281/eth-23281-02.pdf>. – Zugriffsdatum: 18.08.2009
- [Jung und Postel J. 2009] JUNG, U. ; POSTEL J.: Stand der Biogastechnik: Überblick zu aktuellen Trends und Entwicklungen. In: FACHVERBAND BIOGAS E.V.

- (Hrsg.): *Dezentral erzeugen regional profitieren international gewinnen*. Freising, 2009, S. 53–58
- [Junghans 1987] JUNGHANS, K.: *Ermittlung optimaler Kenngrößen der mikrobiellen Methanerzeugung bei Verwendung unterschiedlicher Substrate*, Technische Hochschule Leuna Merseburg, Dissertation, 1987
- [Kaiser 2008] KAISER, F.: Entwicklung eines Berechnungsmodells für die Bestimmung des Methanpotenzials aus nachwachsenden Rohstoffen. In: FACHVERBAND BIOGAS E.V. (Hrsg.): *Wirtschaftlichkeit und Finanzierung, Energienutzungseffizienz, Perspektiven der Biogasbranche, Biomasseanbau, Gärbiologie / Aufbereitung von Biogas, Technik, Gaseinspeisung*. URL [\url{http://www.lfl.bayern.de/itt/umwelttechnik/29252/linkurl_0_2_0_0.pdf}](http://www.lfl.bayern.de/itt/umwelttechnik/29252/linkurl_0_2_0_0.pdf). – Zugriffsdatum: 08.09.2009, 2008, S. 131–135
- [Kaltschmitt 2009] KALTSCHMITT, M.: Einleitung und Zielsetzung. In: KALTSCHMITT, M. (Hrsg.) ; HARTMANN, H. (Hrsg.) ; HOFBAUER, H. (Hrsg.): *Energie aus Biomasse*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2009 (Springer-11774 /Dig. Serial]), S. 1–6
- [Kaltschmitt et al. 2006] KALTSCHMITT, M. ; SCHEUERMANN, A. ; SCHOLWIN, F. ; WILFERT, R.: Stellung und Bedeutung von Biogas als regenerativer Energieträger in Deutschland. In: FNR (Hrsg.): *Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung*. Gülzow : Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2006, S. 221–227. – ISBN 3000143335
- [Kampen 2005] KAMPEN, I.: *Einfluss der Zellaufschlussmethode auf die Expanded Bed Chromatographie*. Braunschweig, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2005. – URL [\url{http://rzbl04.biblio.etc.tu-bs.de:8080/docportal/servlets/MCRFileNodeServlet/DocPortal_derivate_00003443/Kampen_Dissertation.pdf?hosts=local&lang=en}](http://rzbl04.biblio.etc.tu-bs.de:8080/docportal/servlets/MCRFileNodeServlet/DocPortal_derivate_00003443/Kampen_Dissertation.pdf?hosts=local&lang=en)
- [Kampen et al. 2004] KAMPEN, I. ; NOLTE, A. ; SCHWEDES, J.: Auswirkungen der Zellaufschlussmethode auf die Zelltrümmer von *Bacillus megaterium*. In: *Chemie Ingenieur Technik - CIT* 76 (2004), Nr. 4, S. 482–484
- [Kehres 2007] KEHRES, B.: Status quo und Perspektiven der biologischen Abfallbehandlung und -verwertung. In: WIEMER, K. (Hrsg.) ; KERN, M. (Hrsg.): *Weiterentwicklung der biologischen Abfallbehandlung vor dem Hintergrund von TA Luft und EEG*. Witzenhausen : Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, 2007, S. 75–84

- [Keil et al. 2005] KEIL, C. Plura S. ; KREN, C. ; SCHWEIGLER, C.: Einsatzbeispiele angepasster Absorptionswärmepumpen mit Heizleistung über 500 kW. In: DKV (Hrsg.): *Deutsche Kälte-Klima Tagung 2005*. Stuttgart : Eigenverlag, 2005. – URL [\url{http://www.energiearbeitskreis.de/seiten/vortrag/zae_29/Paper_DKV_2005.pdf}](http://www.energiearbeitskreis.de/seiten/vortrag/zae_29/Paper_DKV_2005.pdf)
- [Kim et al. 2003] KIM, J. ; PARK, C. ; KIM, T. H. ; LEE, M. ; KIM, S. ; KIM, S. W. ; LEE, J.: Effects of various pretreatments for enhanced anaerobic digestion with waste activated sludge. In: *Journal of Bioscience and Bioengineering* 95 (2003), Nr. 3, S. 271–275. – URL [\url{http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VSD-494YTNV-B/2/236ec89bb364cfa2d262eec4c1e3f804}](http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VSD-494YTNV-B/2/236ec89bb364cfa2d262eec4c1e3f804). – ISSN 1389-1723
- [Kleinig und Middelberg 1996] KLEINIG, A. R. ; MIDDELBERG, P. J.: The correlation of cell disruption with homogenizer valve pressure gradient determined by computational fluid dynamics. In: *Chemical Engineering Science* 51 (1996), Nr. 23, S. 5103–5110. – URL [\url{http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TFK-3VVMHVT-5/2/afc09ef1d34da477ca6d54892f4f7b1c}](http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TFK-3VVMHVT-5/2/afc09ef1d34da477ca6d54892f4f7b1c). – ISSN 0009-2509
- [Knackmuss 1997] KNACKMUSS, H. J.: Abbau von Natur- und Fremdstoffen. In: OTTOW, J. C. G. (Hrsg.) ; BIDLINGMAIER, W. (Hrsg.): *Umweltbiotechnologie*. Stuttgart : Fischer, 1997, S. 39–80. – ISBN 3827407710
- [Knopf et al. 2006] KNOPF, U. ; TELSCHOW, D. ; MIELKE, A.: *Erhöhung der Effektivität der Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen durch Enzymeinsatz: VTI Poster Enzymeinsatz- 050929\374*. 2006. – URL [\url{http://www.biogas-infoboard.de/pdf/VTI%20Poster%20Enzymeinsatz-%20050929.pdf}](http://www.biogas-infoboard.de/pdf/VTI%20Poster%20Enzymeinsatz-%20050929.pdf). – Zugriffsdatum: 09.09.2009
- [Koster und Koomen 1988] KOSTER, I. W. ; KOOMEN, E.: Ammonia inhibition of the maximum growth rate of hydrogenotrophic methanogens at various pH-levels and temperatures. In: *Applied Microbiology and Biotechnology* (1988), Nr. 28, S. 500–505. – URL [\url{http://www.springerlink.com/content/j83050w2210w76j4/fulltext.pdf}](http://www.springerlink.com/content/j83050w2210w76j4/fulltext.pdf). – Zugriffsdatum: 03.11.2009
- [Kretschmer 1997] KRETSCHMER, S.: *Fortschritt-Berichte VDI Reihe 17, Biotechnik/Medizintechnik*. Bd. 165: *Untersuchungen zur Verkürzung der Verweilzeit bei der Hydrolyse von Cellulose und bei der anaeroben Fermentation lignocellulosehaltiger Lebensmittelreststoffe am Beispiel von Biertrebern*. Techn. Univ., Diss-München. Düsseldorf : VDI-Verl, 1997. – ISBN 3183165171

- [Krieg 2000] KRIEG, A.: *Grasvergärung aus wissenschaftlicher Sicht: in: Dokumentation zum 1. Graskraft-Seminar am 19. Mai 2000, Landwirtschaftliche Lehranstalten Triesdorf*. 2000. – URL `\url{http://www.kriegfischer.de/texte/Grasvergaerungauswissenschaftlicher.pdf}`. – Zugriffsdatum: 08.09.2009
- [Kroiss und Svardal 2005] KROISS, H. ; SVARDAL, K.: Einflussfaktoren auf die anaeroben biologischen Abbauvorgänge. In: BISCHOFBERGER, W. (Hrsg.) ; BÖHNKE, B. (Hrsg.) ; BSDOK, J. (Hrsg.) ; DICHTL, N. (Hrsg.) ; ROSENWINKEL, K. H. (Hrsg.) ; SCHRÖTER, T. (Hrsg.) ; SEYFRIED, C. F. (Hrsg.): *Anaerobtechnik*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005 (Springer-11777 /Dig. Serial]), S. 49–86. – ISBN 9783540265931
- [Kück und Wolff 2009] KÜCK, U. ; WOLFF, G.: *Botanisches Grundpraktikum: Mit 11 Tabellen*. 2., überarb. und akt. Aufl. Berlin : Springer, 2009 (Springer-Lehrbuch). – ISBN 9783540886488
- [Kufferath 2006] KUFFERATH: *Energieverbrauch Schneckenpresse Akupress A 250: Telefonische Auskunft der Andreas Kufferath GmbH & Co KG, 04.12.2006*. 2006
- [Kumakura 1984] KUMAKURA, M. Kaetsu I.: Pretreatment by radiation and acids of chaff and its effect on enzymatic hydrolysis of cellulose. In: *Agricultural Wastes* (1984), Nr. 9, S. 279–287
- [Kunst 2005] KUNST, S.: Mikrobiologische Grundlagen. In: BISCHOFBERGER, W. (Hrsg.) ; BÖHNKE, B. (Hrsg.) ; BSDOK, J. (Hrsg.) ; DICHTL, N. (Hrsg.) ; ROSENWINKEL, K. H. (Hrsg.) ; SCHRÖTER, T. (Hrsg.) ; SEYFRIED, C. F. (Hrsg.): *Anaerobtechnik*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005 (Springer-11777 /Dig. Serial]), S. 23–48. – ISBN 9783540265931
- [Kurabi et al. 2005] KURABI, A. ; BERLIN, A. ; GILKES, N. ; KILBURN, D. ; BURA, R. ; ROBINSON, J. ; MARKOV, A. ; SKOMAROVSK, A. ; GUSAKOV, A. ; OKUNEW, O. ; SINITSYN, A. ; GREGG, D. ; XIE, D. ; SADDLER, J. N.: Enzymatic hydrolysis of steam-exploded and ethanol organosolv-pretreated douglas-fir by novel and commercial fungal cellulases. In: *Applied Biochemistry and Biotechnology* 121 (2005), Nr. 1-3, S. 219–230. – URL `\url{http://www.springerlink.com/content/3863k00016t70031/}`
- [Kurakake et al. 2007] KURAKAKE, M. ; IDE, N. ; KOMAKI, T.: Biological Pretreatment with Two Bacterial Strains for Enzymatic Hydrolysis of Office Paper. In: *Current Microbiology* 54 (2007), Nr. 6, S. 424–428. – URL `\url{http://www.springerlink.com/content/243212425rt33478/}`

- [Langhans 1997] LANGHANS, G.: Reale Werte. In: *Müllmagazin* 1 (1997), Nr. 97, S. 30–33, zitiert in [Loll 2002]
- [Langhans 1999] LANGHANS, G.: Welche Vorteile bringt die Vergärung mit getrennter Hydrolyse. In: *EntsorgungsPraxis* (1999), Nr. 10/99, S. 26–31
- [Leisola und Garcia 1989] LEISOLA, M. S. A. ; GARCIA, S.: The Mechanism of Lignin Degradation. In: COUGHLAN, M. P. (Hrsg.): *Enzyme systems for lignocellulose degradation*. London : Elsevier, 1989, S. 89–99. – ISBN 1851664114
- [Lemmer 2005] LEMMER, A.: *Kofermentation von Grüngut in landwirtschaftlichen Biogasanlagen*. Hohenheim, Universität Hohenheim, Dissertation, 2005
- [Liebeneiner 2006] LIEBENEINER, R.: *Möglichkeiten der Steigerung des Biogas-ertrages durch vorherige Vakuum-Siede-Extraktion zu vergärender Biomasse und Abfallstoffe*. Braunschweig, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2006
- [Liu et al. 2002] LIU, H. W. ; WALTER, H. K. ; VOGT, G. M. ; VOGT, H. S. ; HOLBEIN, B. E.: Steam pressure disruption of municipal solid waste enhances anaerobic digestion kinetics and biogas yield. In: *Biotechnology and Bioengineering* 77 (2002), Nr. 2, S. 121–130. – URL <http://dx.doi.org/10.1002/bit.10130>. – ISSN 1097-0290
- [Lorenz 1996] LORENZ, Rolf J.: *Grundbegriffe der Biometrie: 59 Tabellen, XI Tafeln und 61 Beispiele*. 4., durchges. Aufl. Stuttgart : Fischer, 1996. – ISBN 3-437-25100-7
- [Lüdecke und Lüdecke 2000] LÜDECKE, D. ; LÜDECKE, C.: *Thermodynamik: Physikalisch-chemische Grundlagen der thermischen Verfahrenstechnik*. Berlin : Springer, 2000. – URL <http://www.gbv.de/dms/hebis-darmstadt/toc/92749313.pdf>. – ISBN 3540668055
- [Mais et al. 2002] MAIS, U. ; ESTEGHLALIAN, A. R. ; SADDLER, J. N. ; MANSFIELD, S. D.: Enhancing the enzymatic hydrolysis of cellulosic materials using simultaneous ball milling. In: *Applied Biochemistry and Biotechnology* (2002), Nr. 98-100, S. 815–832. – URL <http://www.springerlink.com/content/j5081562q231274k/fulltext.pdf>. – Zugriffsdatum: 19.01.2010
- [Mamar und Hadjadj 1990] MAMAR, S. Ait S. ; HADJADJ, A.: Radiation pretreatments of cellulose materials for the enhancement of enzymatic hydrolysis: Special Issue Radiation Processing: State of the Art.

- In: *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part C. Radiation Physics and Chemistry* 35 (1990), Nr. 1-3, S. 451–455. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6X4F-46M9Y1M-12G/2/c781d1d37b7c4a90c49c91d27e00faa7>. – ISSN 1359-0197
- [Mata-Alvarez et al. 2000] MATA-ALVAREZ, J. ; MACÉ, S. ; LLABRÉS, P.: Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. In: *Bioresource Technology* 74 (2000), Nr. 1, S. 3–16. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V24-401HDXD-2/2/1d6db046439ae80e3813dcbef0bf5b0b>. – ISSN 0960-8524
- [Meak 2002] MEAK, P.: *Biochemische Charakterisierung von Pflanzen unterschiedlicher Nutzungsintensität zur Ableitung von Parametern für die Ermittlung des energetischen Futterwertes*. Berlin, Humboldt- Universität zu Berlin, Dissertation, 2002. – URL http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?idn=965047032&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=965047032.pdf. – Zugriffsdatum: 23.06.2009
- [Miah et al. 2005] MIAH, M. S. ; TADA, C. ; YANG, Y. ; SAWAYAMA, S.: Aerobic thermophilic bacteria enhance biogas production. In: *Journal of Material Cycles and Waste Management* 7 (2005), Nr. 1, S. 48–54
- [Middelberg 1995] MIDDELBERG, A. P. J.: Process-scale disruption of microorganisms. In: *Biotechnology Advances* 13 (1995), Nr. 3, S. 491–551. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6T4X-3Y451XN-VW/2/f920e8314b46bcd4c8b2037b061bf7ba>. – ISSN 0734-9750
- [Moeller-Chávez und González-Martínez 2002] MOELLER-CHÁVEZ, G. ; GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, S.: Two combined techniques to enhance anaerobic digestion of sludge. In: *Water Science & Technology* 46 (2002), S. 167–172
- [Möller 1992] MÖLLER, M.: *Chemisch-physikalischer Aufschluss von Biertreber als Vorbehandlung zur anaeroben Fermentation zu Biogas*. München, Technische Universität München-Weihenstephan, Dissertation, 1992
- [Moriyama und Oda 1992] MORIHARA, K. ; ODA, K.: Microbial Degradation of Proteins. In: WINKELMANN, G. (Hrsg.): *Microbial degradation of natural products*. Weinheim : VCH, 1992, S. 294–364. – ISBN 1560811692

- [Morohoshi 2001] MOROHOSHI, N.: Chemical characterization of wood and its components. In: HON, David N.-S (Hrsg.) ; SHIRAISHI, Nobuo (Hrsg.): *Wood and cellulosic chemistry*. New York, NY : Dekker, 2001, S. 331–392. – ISBN 0824700244
- [Mshandete et al. 2008] MSHANDETE, A. M. ; BJÖRNSSON, L. ; KIVAISI, A. K. ; RUBINDAMAYUGI, M. S. T. ; MATTIASSON, B.: Effect of aerobic pre-treatment on production of hydrolases and volatile fatty acids during anaerobic digestion of solid sisal leaf decortication residues. In: *African Journal of Biochemistry Research* 2 (2008), Nr. 5, S. 111–119. – URL <http://academicjournals.org/AJBR/PDF/Pdf2008/May/Mshandete%20et%20al.pdf>
- [Müller 1996] MÜLLER, J.: *Mechanischer Klärschlamm-aufschluss*. Braunschweig, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 1996
- [Mundhenke 2002] MUNDHENKE, R. C.: *Einfluß der Zerkleinerung auf die Bio-verfügbarkeit von organischen Substraten*. Braunschweig, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2002
- [Negro et al. 2003] NEGRO, M. J. ; PALOMA, M. ; BALLESTEROS, I. ; OLIVA, J. M. ; CABANAS, A. ; BALLESTEROS, M.: Hydrothermal pretreatment conditions to enhance ethanol production from poplar biomass. In: *Applied Biochemistry and Biotechnology* (2003), Nr. 105-108, S. 87–100. – URL <http://www.springerlink.com/content/608644j55576q781/fulltext.pdf>. – Zugriffsdatum: 26.10.2009
- [Nickel 2002] NICKEL, K.: *Intensivierung der anaeroben Klärschlammstabilisierung durch vorgeschalteten Zellaufschluss mittels Ultraschall*. Hamburg-Harburg, Technische Universität Hamburg-Harburg, Dissertation, 2002
- [Niltsh und Wenzel 2009] NILTSCH, J. ; WENZEL, B. ; UMWELT, Naturschutz und Reaktorsicherheit (. Bundesministerium für (Hrsg.): *Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland unter Berücksichtigung der europäischen und globalen Entwicklung: Leitszenario 2009*. 2009. – URL http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitszenario2009_bf.pdf
- [Nultsch 1996] NULTSCH, W.: *Allgemeine Botanik*. 10. Stuttgart : Thieme, 1996
- [Nultsch 2001] NULTSCH, W.: *Allgemeine Botanik: Glossarium mit 803 Stichworten*. 11., völlig Neubearb. und erw. Aufl. Stuttgart : Thieme, 2001. – ISBN 3133833111

- [Ochs 2005] OCHS, A.: *Entwicklung eines Schnelltests zur Beschreibung des anaeroben Abbauverhaltens nativ organischer Stoffgemische: Der Mikrowellendruckaufschluss in einem neuartigen Einsatzbereich*. Aachen, Universität Duisburg-Essen, Dissertation, 2005
- [Oechsner und Lemmer 2009] OECHSNER, H. ; LEMMER, A.: Wie lässt sich die Effizienz einer Biogasanlage steigern. In: FACHVERBAND BIOGAS E.V. (Hrsg.): *Dezentral erzeugen regional profitieren international gewinnen*. Freising, 2009, S. 105–112
- [Ottow und Bidlingmaier 1997] OTTOW, J. C. G. (Hrsg.) ; BIDLINGMAIER, W. (Hrsg.): *Umweltbiotechnologie*. Stuttgart : Fischer, 1997. – URL \url{http://www.gbv.de/dms/goettingen/225742985.pdf}. – ISBN 3827407710
- [Palmowski 2000] PALMOWSKI, L.: *Zerkleinerungs- und Abbauverhalten organischer Materialien*. Braunschweig, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2000
- [Parawira et al. 2005] PARAWIRA, W. ; MURTO, M. ; READ, J. S. ; MATTIASSON, B.: Profile of hydrolases and biogas production during two-stage mesophilic anaerobic digestion of solid potato waste. In: *Process Biochemistry* 40 (2005), Nr. 9, S. 2945–2952. – URL \url{http://www.sciencedirect.com/science/article/B6THB-4GNCXXB-1/2/4a3391f30feb445a99a1ab6642845437}. – ISSN 1359-5113
- [Park et al. 2004] PARK, B. ; AHN, J. H. ; KIM, J. ; HWANG, S.: Use of microwave pretreatment for enhanced anaerobiosis of secondary sludge. In: *Water Science & Technology* 50 (2004), Nr. 9, S. 17–23. – URL \url{http://lequia.udg.es/lequianet/WatSciTech/05009/0017/050090017.pdf}
- [Penaud et al. 1999] PENAUD, V. ; DELGENÈS, J. P. ; MOLETTA, R.: Thermo-chemical pretreatment of a microbial biomass: influence of sodium hydroxide addition on solubilization and anaerobic biodegradability. In: *Enzyme and Microbial Technology* 25 (1999), Nr. 3-5, S. 258–263. – URL \url{http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TG1-3X52X4M-G/2/f8ac4fd3207c41ff43d12b031b1a263b}. – ISSN 0141-0229
- [Pesta und Lenz 2006] PESTA, G. ; LENZ, J. ; WISSENSFÖRDERUNG DER DEUTSCHEN BRAUWIRTSCHAFT E.V. (Hrsg.): *Verzuckerung von Biertrebern durch Mischenzyme zur Steigerung der spezifischen Gasausbeute bei der anaeroben Vergärung: Abschlussbericht - Forschungsvorhaben R 399*. 2006. – URL \url{http://www.wifoe.org/Berichte%20und%20Dokumente/R%20399%20SchlB.pdf}

- [Pfeiffer 1990] PFEIFFER, W.: *Verfahrensvarianten der biologischen Stabilisierung und Entseuchung von Klärschlamm: Leistungsvergleich*. München, Technische Universität München, Dissertation, 1990
- [Pinnekamp 1987] PINNEKAMP, J.: *Gewässerschutz, Wasser, Abwasser*. Bd. 96: *Steigerung der Leistungsfähigkeit der anaeroben Schlammstabilisierung durch eine thermische Vorbehandlung des Schlammes*. Aachen, 1987
- [Prechtl 2001] PRECHTL, S.: *Einfluß der Vorbehandlung auf die anaerobe Verwertung organischer Abfälle*. Bd. 229. Reihe 15, Umwelttechnik. Düsseldorf : VDI-Verl., 2001. – ISBN 3183229153
- [Prechtl et al. 1998] PRECHTL, S. ; JUNG, R. ; BISCHOF, F.: Erhöhung der Faulgasausbeute durch Vorbehandlung mit Thermodruckhydrolyse. In: *EntsorgungsPraxis* (1998), Nr. 5, S. 66–68
- [Preißler et al. 2009] PREISLER, D. ; LEMMER, A. ; OECHSNER, H.: Die bedeutung der Spurenelemente bei der Ertragssteigerung und Prozessstabilität. In: FACHVERBAND BIOGAS E.V. (Hrsg.): *Dezentral erzeugen regional profitieren international gewinnen*. Freising, 2009, S. 123–126
- [Radke 2000] RADKE, D.: *Untersuchungen zur Verbesserung der biochemischen Umsatzrate lignocellulosehaltiger organischer Abfälle*. Aachen, RWTH Aachen, Dissertation, 2000
- [Ramesohl und Arnold 2005] RAMESOHL, S. ; ARNOLD, K. ; INSTITUT FÜR ENERGETIK UND UMWELT GMBH (Hrsg.): *Analyse und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse: Band 2: Biomassepotenziale in Deutschland, Nutzungstechniken und ökonomisch-ökologische Bewertung ausgewählter Nutzungspfade (IE Leipzig): Untersuchung im Auftrag von BGW und DVGW*. 2005. – URL [\url{http://www.biogaseinspeisung.de/download/Endbericht-Band2_IEL.pdf}](http://www.biogaseinspeisung.de/download/Endbericht-Band2_IEL.pdf). – Zugriffsdatum: 25.08.2009
- [Ramesohl und Arnold 2006] RAMESOHL, S. ; ARNOLD, K. ; WUPPERTAL INSTITUT FÜR KLIMA UND ENERGIE (Hrsg.): *Analyse und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse: Endbericht: Band 1: Gesamtergebnisse und Schlussfolgerungen: Untersuchung im Auftrag von BGW und DVGW*. 2006. – URL [\url{http://www.wupperinst.org/uploads/tx_wiprojekt/1110-report.pdf}](http://www.wupperinst.org/uploads/tx_wiprojekt/1110-report.pdf). – Zugriffsdatum: 21.08.2009

- [Rand et al. 2008] RAND, W. ; DOCKHORN, T. ; DICHTL, N.: Untersuchungen zur Klärschlammintegration mittels Thermodruckhydrolyse. In: *Müll und Abfall* (2008), Nr. 09, S. 456–461. – URL http://www.muellundabfall.de/.download/_sid/WAUQ-099984-YD08/pdf/mua_20080905.pdf#search=%22Untersuchungen%20zur%20Kl%C3%A4rschlammintegration%20mittels%20Thermodruckhydrolyse%20Zur%20unzureichende%20zur%C3%BCckgef%C3%BChrt%20zur%C3%BCckzuf%C3%BChren%22. – Zugriffsdatum: 03.08.2009
- [Raven et al. 2006] RAVEN, P. H. ; EVERT, R. F. ; EICHHORN, S. E.: *Biologie der Pflanzen*. 4. Aufl. Berlin : de Gruyter, 2006. – URL http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?id=2784022&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm. – ISBN 9783110185317
- [Reineke und Schlömann 2007] REINEKE, W. ; SCHLÖMANN, M.: *Umweltmikrobiologie*. 1. Aufl. München : Elsevier Spektrum Akad. Verl., 2007. – URL <http://www.gbv.de/dms/hebis-darmstadt/toc/124070035.pdf>. – ISBN 9783827413468
- [Reulein et al. 2007] REULEIN, J. ; WACHENDORF, M. ; SCHEFFER, K.: Effizienzsteigerung in der Bioenergieerzeugung durch Abpressen der Biomasse. In: WIEMER, K. (Hrsg.) ; KERN, M. (Hrsg.): *Bio- und Sekundärrohstoffverwertung II*. Witzenhausen : Eigenverlag, 2007
- [Riedel 2004] RIEDEL, E.: *Allgemeine und anorganische Chemie: Lehrbuch für Studenten mit Nebenfach Chemie*. 8., überarb. Aufl. Berlin : de Gruyter, 2004 (De-Gruyter-Lehrbuch). – URL <http://www.gbv.de/dms/ilmenau/toc/387029850.PDF>. – ISBN 3110181460
- [Roediger et al. 1990] ROEDIGER, H. ; ROEDIGER, M. ; KAPP, H.: *Anaerobe alkalische Schlammfaulung*. Oldenbourg, 1990
- [Ruiz et al. 2006] RUIZ, E. ; CARA, C. ; BALLESTEROS, M. ; MANZANARES, P. ; BALLESTEROS, I. ; CASTRO, E.: Ethanol production from pretreated olive tree wood and sunflower stalks by an SSF process. In: *Applied Biochemistry and Biotechnology* 130 (2006), Nr. 1-3, S. 631–643. – URL <http://www.springerlink.com/content/d4837683r3h00h0n/>
- [Santen 2007] SANTEN, H.: *Die Perkolations zur Vorbehandlung von Abfällen vor der Vergärung: Einflussgrößen und Leistungsdaten sowie Konsequenzen für*

- die großtechnische Umsetzung.* Braunschweig, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2007. – URL \url{http://www.gbv.de/dms/weimar/toc/566032422_toc.pdf/http://www.gbv.de/dms/bs/toc/566032422.pdf}
- [Schalow 2009] SCHALOW, S.: *Untersuchungen zum enzymatisch-physikalischen Aufschluss von Apfeltrester.* Berlin, Technische Universität Berlin, Dissertation, 2009. – URL \url{http://opus.kobv.de/tuberlin/volltexte/2009/2139/pdf/schalow_sebastian.pdf}. – Zugriffsdatum: 31.08.2009
- [Schattauer und Weiland 2006a] SCHATTAUER, A. ; WEILAND, P.: Beschreibung ausgewählter Substrate. In: FNR (Hrsg.): *Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung.* Gülzow : Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2006, S. 86–96. – ISBN 3000143335
- [Schattauer und Weiland 2006b] SCHATTAUER, A. ; WEILAND, P.: Grundlagen der anaeroben Fermentation. In: FNR (Hrsg.): *Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung.* Gülzow : Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2006, S. 25–35. – ISBN 3000143335
- [Scheibenzuber 2002] SCHEIBENZUBER, M.: *Molekulare und klinische Auswirkungen einer Hochdruckbehandlung von allergenen Lebensmitteln.* München, Technische Universität München, Dissertation, 2002
- [Scherer 2002] SCHERER, A.: Biologie der Anaerobtechnik. In: LOLL, U. (Hrsg.): *Mechanische und biologische Verfahren der Abfallbehandlung* Bd. ... Berlin : Ernst & Sohn, 2002, S. 119–148. – ISBN 3433014701
- [Scherer 2001] SCHERER, P. A.: Mikrobiologie der Vergärung von festen Abfallstoffen. In: KÄMPFER, P. (Hrsg.) ; WEISSENFELS, W. D. (Hrsg.): *Biologische Behandlung organischer Abfälle.* Berlin : Springer, 2001, S. 45–80. – ISBN 35404191526990
- [Schieder et al. 2000] SCHIEDER, D. ; SCHNEIDER, R. ; BISCHOF, F.: Thermal hydrolysis (TDH) as a pretreatment method for the digestion of organic waste. In: *Water Science & Technology* 41 (2000), Nr. 3, S. 181–187
- [Schlegel et al. 2007] SCHLEGEL, H. G. ; FUCHS, G. ; EITINGER, T.: *Allgemeine Mikrobiologie: 53 Tabellen.* 8., vollst. überarb. und erw. Aufl. Stuttgart : Thieme, 2007. – URL \url{<http://www.gbv.de/dms/ilmeneau/toc/516656325fuchs.pdf>}. – ISBN 9783134446081

- [Schlesinger et al. 2010] SCHLESINGER, M. ; LINDENBERGER, D. ; LUTZ, C. ;
BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND TECHNOLOGIE (Hrsg.): *Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung: Projekt Nr. 12/10*. 2010. – URL http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/energieszenarien_2010.pdf
- [Schmid-Schmieder 2009] SCHMID-SCHMIEDER, V.: Potenziale der Klärschlamm-Desintegration. In: *Wasserwirtschaft Wassertechnik* (2009), Nr. 3, S. 32–38
- [Scholander et al. 1964] SCHOLANDER, P. F. ; HAMMEL, H. T. ; HEMMINGSEN, E. A. ; BRADSTREET, E. D.: Hydrostatic pressure and osmotic potential in leaves of mangroves and some other plants. In: *Proc Natl Acad Sci U S A* 52 (1964), Nr. 1, S. 119–125. – URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC300583/?report=abstract>
- [Scholwin et al. 2009] SCHOLWIN, F. ; LIEBETRAU, J. ; EDELMANN, W.: Biogaserzeugung und -nutzung. In: KALTSCHMITT, M. (Hrsg.) ; HARTMANN, H. (Hrsg.) ; HOFBAUER, H. (Hrsg.): *Energie aus Biomasse*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2009 (Springer-11774 /Dig. Serial]), S. 851–931
- [Scholwin und Nelles 2009] SCHOLWIN, F. ; NELLES, M.: Biogastechnologie in Deutschland - Status und Optimierungspotenziale. In: *Müll und Abfall* (2009), Nr. 5, S. 228–232
- [Schopfer 2006] SCHOPFER, P.: *Pflanzenphysiologie*. 6. Aufl. München : Elsevier Spektrum Akad. Verl., 2006. – ISBN 3827415616
- [Seiler und Pöpel 1998] SEILER, K. ; PÖPEL, J.: Halbtechnische Versuche zur einstufigen Schlammfäulung nach mechanischem Aufschluss. In: MÜLLER, J. (Hrsg.) ; DICHTL, N. (Hrsg.) ; SCHWEDES, J. (Hrsg.): *Klärschlamm-desintegration - Forschung und Anwendung* Bd. 61. Braunschweig, 1998, S. 131–147
- [Sidiras und Koukios 1989] SIDIRAS, D. K. ; KOUKIOS, E. G.: Acid saccharification of ball-milled straw. In: *Biomass* (1989), Nr. 19, S. 289–306
- [Silverstein et al. 2007] SILVERSTEIN, R. A. ; CHEN, Y. ; SHARMA-SHIVAPPA, R. R. ; BOYETTE, M. D. ; OSBORNE, J.: A comparison of chemical pretreatment methods for improving saccharification of cotton stalks. In: *Bioresource Technology* 98 (2007), Nr. 16, S. 3000–3011. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V24-4MHPGX-1/2/d9433c07d45ad8e8b701fbc62094b550>. – ISSN 0960-8524

- [Steudle et al. 1977] STEUDLE, E. ; ZIMMERMANN, U. ; LUTTGE, U.: Effect of Turgor Pressure and Cell Size on the Wall Elasticity of Plant Cells. In: *Plant Physiol.* 59 (1977), Nr. 2, S. 285–289. – URL <http://www.plantphysiol.org/cgi/content/abstract/59/2/285>
- [Sun et al. 2004] SUN, X. F. ; XU, F. ; SUN, R. C. ; WANG, Y. X. ; FOWLER, P. ; BAIRD, M. S.: Characteristics of degraded lignins obtained from steam exploded wheat straw. In: *Polymer Degradation and Stability* 86 (2004), Nr. 2, S. 245–256. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TXS-4CS4HHX-5/2/a7b06d9fb744338de24129e4ceed24fd>. – ISSN 0141-3910
- [Sun und Cheng 2002] SUN, Y. ; CHENG, J.: Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. In: *Bioresource Technology* 83 (2002), Nr. 1, S. 1–11. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V24-44NM064-2/2/9ad340630a75e06a4b3ce8c75509660d>. – ISSN 0960-8524
- [Taddigs 2000] TADDIGS, T.: *Untersuchung der Versauerung und des Einsatzes von Hydrozyklo*. Braunschweig, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2000. – URL http://bib1lp1.rz.tu-bs.de/docportal/servlets/MCRFileNodeServlet/DocPortal_derivate_00001258/Document.pdf;jsessionid=00008ncsEseeU3XWML_R-t8jtmu?hosts=local. – Zugriffsdatum: 20.08.2009
- [Taherzadeh und Karimi 2008] TAHERZADEH, M. J. ; KARIMI, K.: Pretreatment of Lignocellulosic Wastes to Improve Ethanol and Biogas Production: A Review. In: *International Journal of Molecular Sciences* (2008), Nr. 9, S. 1621–1651. – URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2635757/pdf/ijms-9-1621.pdf>. – Zugriffsdatum: 26.10.2009
- [Tanaka et al. 1997] TANAKA, S. ; KOBAYASHI, T. ; KAMIYAMA, K. ; BILDAN L.: Effects of thermochemical pretreatment on the anaerobic digestion of waste activated sludge. In: *Water Science & Technology* 35 (1997), Nr. 8, S. 209–215
- [Taniguchi et al. 2005] TANIGUCHI, M. ; SUZUKI, H. ; WATANABE, D. ; SAKAI, K. ; HOSHINO, K. ; TANAKA, T.: Evaluation of pretreatment with *Pleurotus ostreatus* for enzymatic hydrolysis of rice straw. In: *Journal of Bioscience and Bioengineering* 100 (2005), Nr. 6, S. 637–643. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VSD-4J7JD6H-9/2/9403960d02c7332fa25307be9db9de55>. – ISSN 1389-1723

- [Thauer et al. 1977] THAUER, R. K. ; JUNGERMANN, K. ; DECKER, K.: Energy conservation in chemotrophic anaerobic bacteria. In: *Microbiology and Molecular Biology Reviews* 41 (1977), Nr. 1, S. 100–180
- [Thauer und Morris 1984] THAUER, R. K. ; MORRIS, J. G.: Metabolism of chemotrophic anaerobes: Old views and new aspects. In: KELLY, D. P. Carr N. G. (Hrsg.): *The microbe 1984. II. Prokaryotes and eukaryotes*. Cambridge : Cambridge University Press, 1984, S. 123–168
- [Thrän et al. 2009] THRÄN, D. ; WITT, J. ; HENNING, C. ; DANIEL-GROMKE, J. ; RENSBERG, N. ; SCHWENKER, A. ; SCHEFTELOWITZ, M. ; WIRKNER, R. ; VETTER, A. ; GRAF, T. ; REINHOLD, G. ; DBFZ - DEUTSCHES BIOMASSE FORSCHUNGS ZENTRUM (Hrsg.): *Monitoring zur Wirkung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse: Zwischenbericht „Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse 2008“*. 2009. – URL \url{http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/zwischenber_mon_bio.pdf}. – Zugriffsdatum: 25.08.2009
- [Tidden 2003] TIDDEN, F.: Leistungsmerkmale und Grenzen der mehrphasigen anaeroben Behandlung kommunaler Bioabfälle. In: *BERICHTE-WASSERGUTE UND ABFALLWIRTSCHAFT TECHNISCHE UNIVERSITAT MUNCHEN BE-RICHTSHEFT* 176 (2003)
- [Tomos 1988] TOMOS, D.: Cellular water relations of plants. In: FRANKS, F. (Hrsg.): *Water Science Reviews* Bd. 3. Cambridge : Cambridge University Press, 1988, S. 186–277. – ISBN 052135014X
- [Tomos 2000] TOMOS, D.: The plant cell pressure probe. In: *Biotechnology Letters* 22 (2000), Nr. 6, S. 437–442. – URL \url{http://www.springerlink.com/content/k43423253042h3h2/}
- [Tyree und Hammel 1972] TYREE, M. T. ; HAMMEL, H. T.: The Measurement of the Turgor Pressure and the Water Relations of Plants by the Pressure-bomb Technique. In: *Journal of Experimental Botany* 23 (1972), Nr. 1, S. 267–282. – URL \url{http://jxb.oxfordjournals.org/cgi/content/abstract/23/1/267}
- [Varga et al. 2004] VARGA, E. ; RÉCZEY, K. ; ZACCHI, G.: Optimization of steam pretreatment of corn stover to enhance enzymatic digestibility. In: *Applied Biochemistry and Biotechnology* 114 (2004), Nr. 1-3, S. 509–523. – URL \url{http://www.springerlink.com/content/945m402v3686k724/}

- [VDI 4630 2006] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *Vergärung organischer Stoffe - Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche*. April 2006
- [Viehmann 2008] VIEHMANN, C.: *Perkolierte Feststoffvergärung von Stroh im Batchbetrieb bei Einsatz von Enzymen*. Weimar, Bauhaus-Universität Weimar, Diplomarbeit, 2008
- [Vollmer 2001] VOLLMER, R.: Erschöpfende Vergärung von Restmüll mit Hygienisierung und Schadstoffabbau. In: BMBF (Hrsg.): *Materialien zum Verbundvorhaben: Mechanisch-biologische Behandlung von zu deponierenden Abfällen*. Berlin, 2001, S. TV_27
- [Voß 2006] VOSS, S.: *Charakterisierung von Stoffen hinsichtlich ihres Gasertrages bei anaerober Behandlung durch die Parameter Kohlenhydrate, Fett und Eiweiß*. Weimar, Bauhaus-Universität Weimar, Dissertation, 2006
- [VTI 2004] VTI: *Grundlagenuntersuchungen zu Art und Umfang der Substrataufbereitung für Gärversuche und Biogasproduktion: Abschlussbericht zum F u. E-Vorhaben, gefördert unter der Projekt-Nr. 2002 WF 0139 durch das Thüringer Ministerium für Wirtschaft und Infrastruktur: Bericht Nr. 064.2/02*. 2004
- [Wagner 1973] WAGNER, W.: New vapour pressure measurements for argon and nitrogen and a new method for establishing rational vapour pressure equations: zitiert in Baehr, 2009. In: *Cryogenics* 13 (1973), Nr. 8, S. 470–482. – zitiert in Baehr [2009]
- [Wallmann und Fricke 2002] WALLMANN, R. ; FRICKE, K.: Energiebilanz bei der Verwertung von Bio- und Grünabfällen und bei der mechanisch-biologischen Restabfallbehandlung. In: LOLL, U. (Hrsg.): *Mechanische und biologische Verfahren der Abfallbehandlung* Bd. ... Berlin : Ernst & Sohn, 2002, S. 385–388. – ISBN 3433014701
- [Wang et al. 2004] WANG, C. X. ; WANG, L. ; THOMAS, C. R.: Modelling the Mechanical Properties of Single Suspension-Cultured Tomato Cells. In: *Annals of Botany* 93 (2004), Nr. 4, S. 443–453. – URL <http://aob.oxfordjournals.org/cgi/content/abstract/93/4/443>
- [Wang et al. 1999] WANG, Q. ; KUNINOBU, M. ; KAKIMOTO, K. ; I.-OGAWA, H. ; KATO, Y.: Upgrading of anaerobic digestion of waste activated sludge by ultrasonic pretreatment. In: *Bioresource Technology* 68 (1999), Nr. 3,

- S. 309–313. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V24-3W315TB-H/2/78146b2322e7e49f3fa5e29eec5586ae>. – ISSN 0960-8524
- [Weiland 2001a] WEILAND, P.: Grundlagen der Methangärung - Biologie und Substrate. In: VDI (Hrsg.): *Biogas als regenerative Energie - Stand und Perspektiven*. Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 2001, S. 19–32
- [Weiland 2001b] WEILAND, P.: Verfahrenstechnik der anaeroben Behandlung organischer Abfälle. In: KÄMPFER, P. (Hrsg.) ; WEISSENFELS, W. D. (Hrsg.): *Biologische Behandlung organischer Abfälle*. Berlin : Springer, 2001, S. 99–122. – ISBN 35404191526990
- [Weiland 2003] WEILAND, P.: *Biologie der Biogaserzeugung: Vortrag 02.04.2003*. 2003. – URL http://www.biogas-infoboard.de/pdf/Biologie_der_Biogaserzeugung.pdf
- [Wellinger 1991] WELLINGER, A.: *Biogas-Handbuch: Grundlagen, Planung, Betrieb landwirtschaftlicher Anlagen*. 2., stark überarb. Aufl. Aarau : Wirz, 1991. – ISBN 385983035X
- [Werner 2007] WERNER, M.: *Thermische Diffusion in Hochdruckprozessen*. München, Technische Universität München, Dissertation, 2007
- [Widmer 2001] WIDMER, C.: *Zusammenfassung von Versuchsergebnissen zur Vakuum-Siede-Extraktion, unveröffentlicht*. 2001
- [Wooley et al. 1999] WOOLEY, R. ; RUTH, M. ; SHEEHAN, J. ; IBSEN, K. ; MAJDESKI, H. ; GALVEZ, A. ; NATIONAL RENEWABLE ENERGY LAB - GOLDEN COLORADO (Hrsg.): *Lignocellulosic Biomass to Ethanol Process Design and Economics Utilizing Co-Current Dilute Acid Prehydrolysis and Enzymatic Hydrolysis Current and Futuristic Scenarios*. 1999
- [Wurm 1986] WURM, S.: *Biogasgewinnung mit aerober Vorstufe: Diss. ETH Nr. 7961*. Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Dissertation, 1986
- [Wyman 1996] WYMAN, C. E.: *Handbook on bioethanol: Production and utilization*. [1. Dr.]. Washington, DC : Taylor & Francis, 1996 (Applied energy technology series). – URL <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0622/96023144-d.html>. – ISBN 1560325534

- [Xu et al. 2007] XU, Z. ; WANG, Q. ; JIANG, Z. ; YANG, X. x. ; JI, Y.: Enzymatic hydrolysis of pretreated soybean straw. In: *Biomass and Bioenergy* 31 (2007), Nr. 2-3, S. 162–167. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V22-4KXVCW2-1/2/9aa3a07bc0f34a5f16c9c729edd1ea7a>. – ISSN 0961-9534
- [Yuan et al. 2007] YUAN, Y. ; ZHANG, L. ; DAI, Y. ; YU, J.: Physicochemical properties of starch obtained from *Dioscorea nipponica* Makino comparison with other tuber starches. In: *Journal of Food Engineering* 82 (2007), Nr. 4, S. 436–442. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6T8J-4N7RW3K-4/2/ce86836d63fe34975dfa197f8122b4b9>. – ISSN 0260-8774
- [Zeng et al. 2007] ZENG, M. ; MOSIER, N. S. ; HUANG, C. P. ; SHERMAN, D. M. ; LADISCH, M. R.: Microscopic examination of changes of plant cell structure in corn stover due to hot water pretreatment and enzymatic hydrolysis. In: *Biotechnology and Bioengineering* 97 (2007), Nr. 2, S. 265–278. – URL <http://dx.doi.org/10.1002/bit.21298>. – ISSN 1097-0290
- [Zhao et al. 2008] ZHAO, X. ; ZHANG, L. ; LIU, D.: Comparative study on chemical pretreatment methods for improving enzymatic digestibility of crofton weed stem. In: *Bioresource Technology* 99 (2008), Nr. 9, S. 3729–3736. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V24-4PG2RV8-3/2/0ad52c0dc946a334d9403048d4415a14>. – ISSN 0960-8524
- [Zhu und Steudle 1991] ZHU, G. L. ; STEUDLE, E.: Water Transport across Maize Roots: Simultaneous Measurement of Flows at the Cell and Root Level by Double Pressure Probe Technique. In: *Plant Physiol.* 95 (1991), Nr. 1, S. 305–315. – URL <http://www.plantphysiol.org/cgi/content/abstract/95/1/305>

Anhang A

Großtechnische Versuche

A.1 Massenbilanzen

Zu Versuch HM5080-1 konnte aufgrund eines Pressenausfalls keine Massenbilanz erstellt werden.

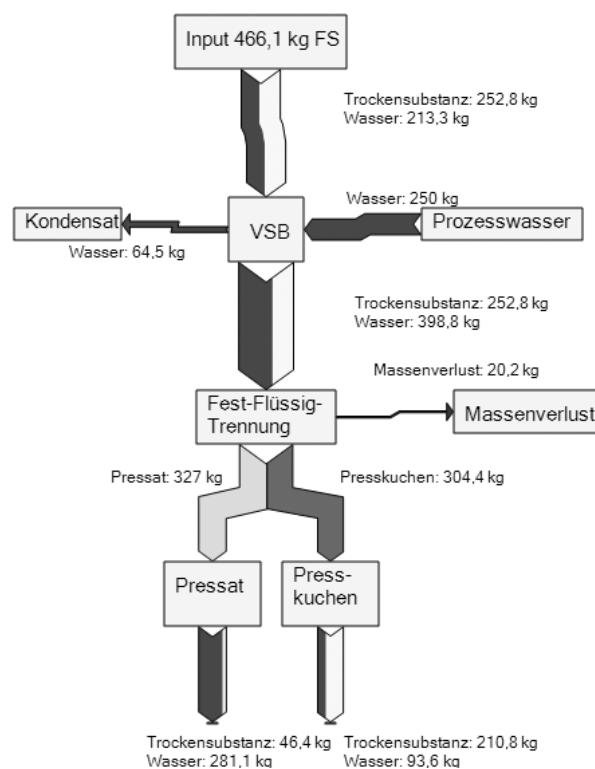


Abbildung A.1: Massenbilanz HM5080-2 Sankey-Darstellung

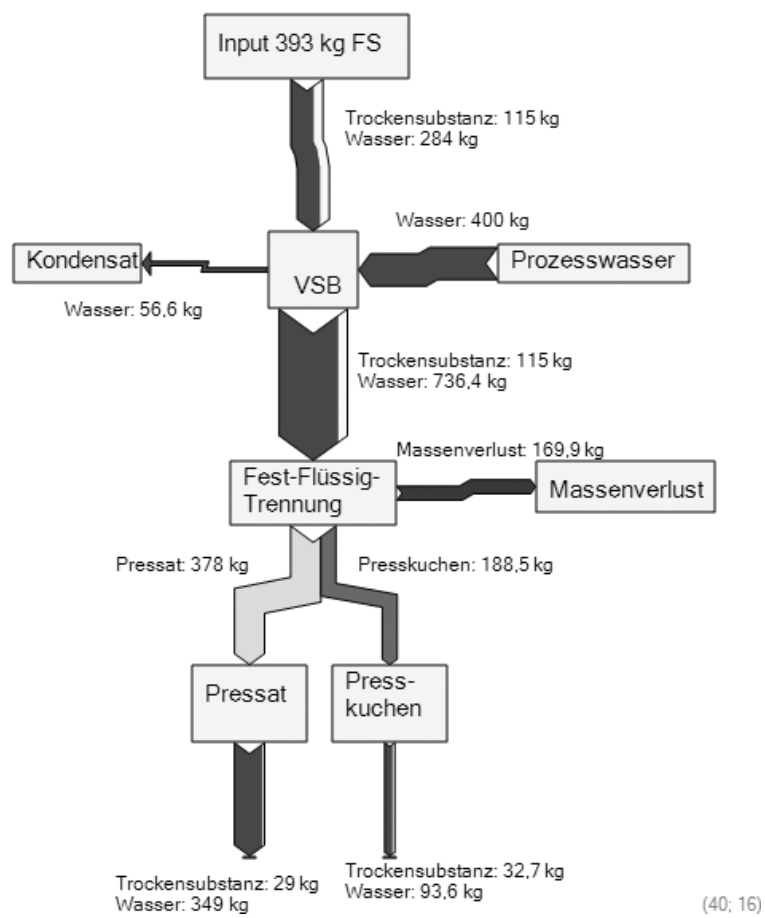


Abbildung A.2: Massenbilanz MB-SI5070 Sankey-Darstellung

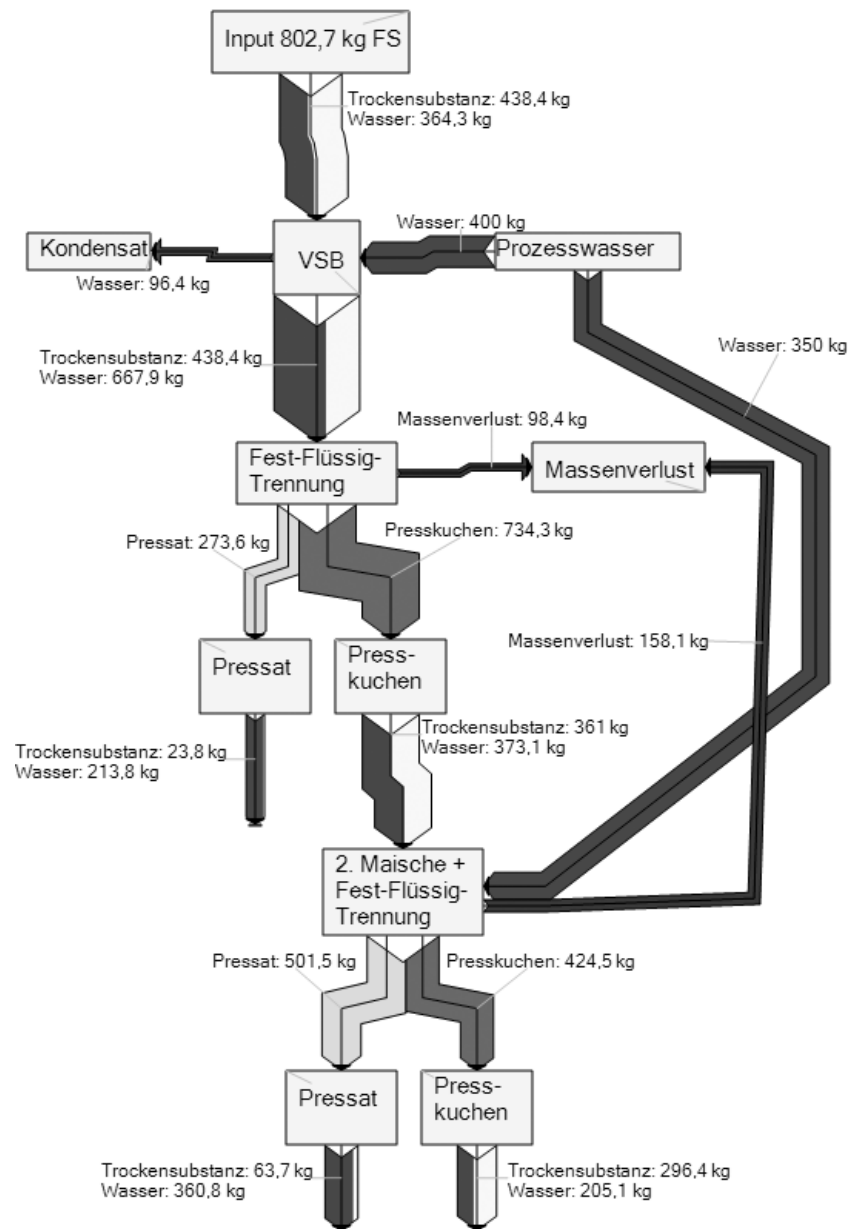


Abbildung A.3: Massenbilanz HM5080-3 Sankey-Darstellung

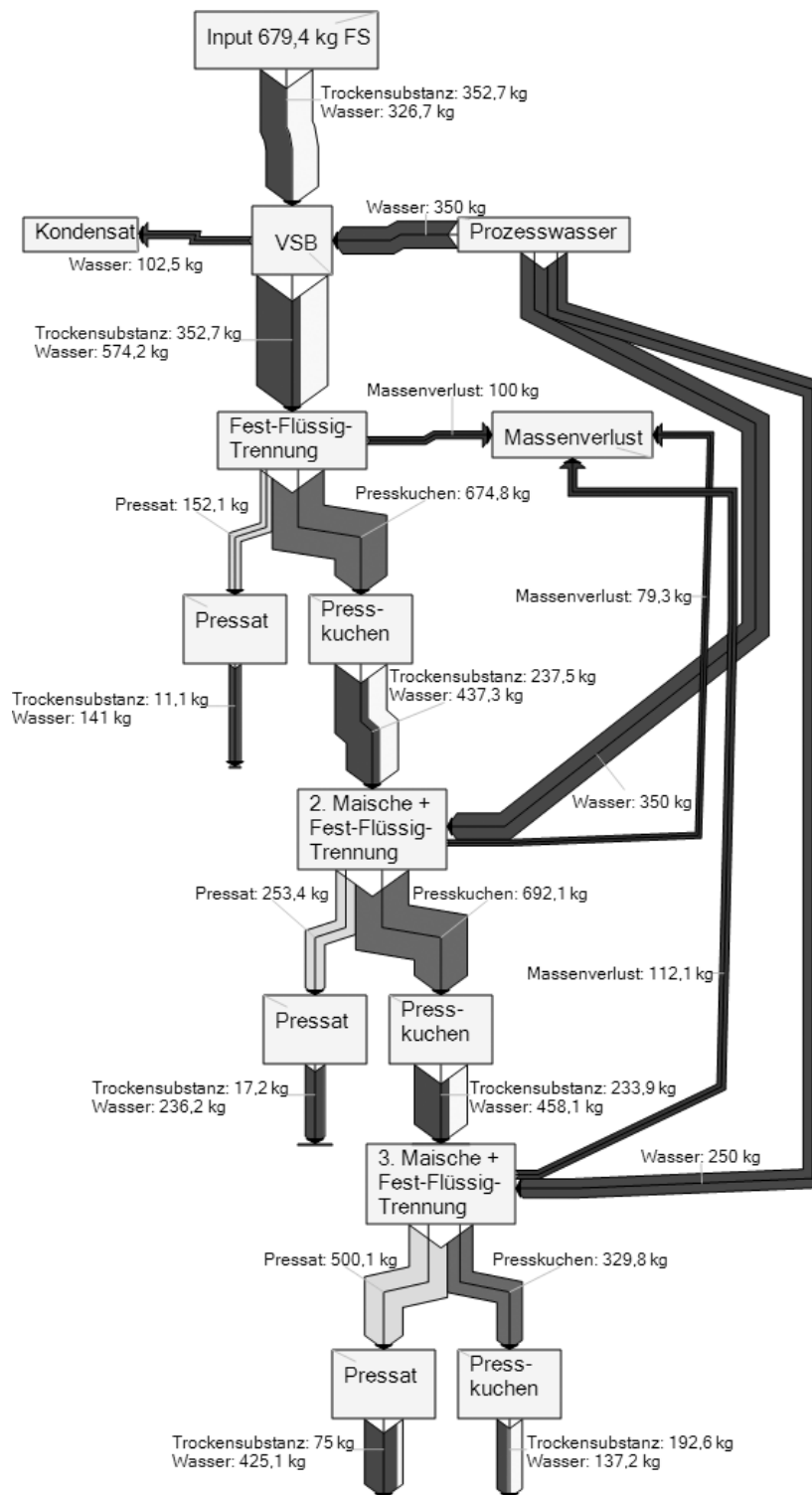


Abbildung A.4: Massenbilanz HM10080 Sankey-Darstellung

Anhang B

Halbtechnische Versuche

B.1 Ausgangssubstrate

B.1.1 Ausgangssubstrat - Maissilage

Tabelle B.1: Frachtangaben zu den im Inputmaterial analysierten Parametern - Maissilage

Variante	Substrat Charge	Frischmasse [kg]	Trockenmasse [kg]	Wasser [kg]	oTS [kg]	CSB [g O ₂]
St0000/00	A	25,0	9,42	25,0	9,02	9.666
St0000/50	A	25,0	9,42	25,0	9,02	9.666
St0000/90	A	25,0	9,42	25,0	9,02	9.666
St5040/00	A	40,0	15,07	40,0	14,44	15.466
St5040/90	A	40,0	15,07	40,0	14,44	15.466
St5090/00	A	40,0	15,07	40,0	14,44	15.466
St5090/90	A	40,0	15,07	40,0	14,44	15.466
St0000/00-0,5	A	40,0	15,07	20,0	14,44	15.466
St0000/00-2	A	40,0	15,07	80,0	14,44	15.466
St-UB	A	25,0	9,42	25,0	9,02	9.666
Sc0000/90	B	40,0	15,11	40,0	14,52	15.993
Sc5040/00	B	40,0	15,11	40,0	14,52	15.993
Sc5040/90	B	40,0	15,11	40,0	14,52	15.993
Sc5090/00	B	40,0	15,11	40,0	14,52	15.993
Sc5090/90	B	40,0	15,11	40,0	14,52	15.993
Sc-UB	B	40,0	15,11	40,0	14,52	15.993
Sc0000/00-2	C	40,0	15,16	80,0	14,54	15.732
Sc0000/90-2	C	40,0	15,16	80,0	14,54	15.732
Sc5040/50-2	C	40,0	15,16	80,0	14,54	15.732
Sc5090/00-2	C	40,0	15,16	80,0	14,54	15.732
Sc5090/90-2	C	41,5	15,73	80,0	15,09	16.322
Ma00-120	D	40,0	15,39	80,0	14,71	16.021
Ma00-360	D	40,0	15,39	80,0	14,71	16.021
Ma00-960	F	40,0	15,12	80,0	14,48	15.574
Ma50-120	E	40,0	15,66	80,0	15,01	16.280
Ma50-360	F	40,0	15,12	80,0	14,48	15.574
Ma50-960	E	40,0	15,66	80,0	15,01	16.280
Ma90-120	D	40,0	15,39	80,0	14,71	16.021
Ma90-360	D	40,0	15,39	80,0	14,71	16.021

B.1.2 Ausgangssubstrat - Bioabfall

Tabelle B.2: Frachtangaben zu den im Inputmaterial analysierten Parametern - Bioabfälle

Variante	Frischmasse [kg]	Trockenmasse [kg]	Wasser [kg]	oTS [kg]	CSB [g O ₂]
WA0000/00-2	40,0	13,85	80,0	9,37	11.207
WA0000/90-2	40,0	13,85	80,0	9,37	11.207
WA0000/90	40,0	13,85	40,0	9,37	11.207
WA5090/90	40,0	13,85	40,0	9,37	11.207
BS0000/00-2	40,0	12,50	80,0	9,48	11.105
BS0000/00-2b	40,0	12,50	80,0	9,48	11.105
BS0000/50-2	40,0	12,50	80,0	9,48	11.105
BS0000/90-2	40,0	12,50	80,0	9,48	11.105

B.2 Versuchsergebnisse

B.2.1 Versuchsergebniss - Maissilage

Tabelle B.3: Outputmasse nach Behandlung und Pressatmassen nach Fest-Flüssig-Trennung - Maissilage

Variante	Masse nach Behandlung [kg]		Masse Pressat [kg]	
	MW	STABW	MW	STABW
St0000/00	46,5	2,4	22,8	1,4
St0000/50	47,7	0,6	25,1	0,8
St0000/90	43,9	2,8	12,3	1,1
St5040/00	64,8	3,3	32,7	1,0
St5040/90	61,7	4,8	23,5	1,1
St5090/00	64,1	1,7	31,2	2,0
St5090/90	59,3	4,7	27,1	7,1
St0000/00-0,5	47,3	3,2	18,2	0,7
St0000/00-2	106,7	1,8	73,1	0,9
St-UB	50,0	0,0	27,9	0,7
Sc0000/90	64,4	3,7	40,7	6,4
Sc5040/00	79,0	0,6	53,1	2,3
Sc5040/90	53,0	1,4	32,4	0,1
Sc5090/00	72,2	1,1	53,8	0,8
Sc5090/90	53,6	8,8	27,9	4,7
Sc-UB	80,0	0,0	53,3	1,6
Sc0000/00-2	105,2	2,1	88,2	1,1
Sc0000/90-2	105,5	0,3	82,9	0,2
Sc5040/50-2	108,8	4,0	89,7	4,1
Sc5090/00-2	108,9	5,1	92,0	4,3
Sc5090/90-2	110,0	8,5	86,0	6,6
Ma00-120	109,6	5,3	83,0	1,1
Ma00-360	109,8	2,3	83,2	3,7
Ma00-960	108,0	1,1	86,5	1,6
Ma50-120	107,5	3,1	86,3	2,5
Ma50-360	108,4	2,6	84,0	0,4
Ma50-960	106,3	1,4	82,3	0,3
Ma90-120	98,1	0,4	79,3	0,9
Ma90-360	99,3	2,9	78,7	0,8

Tabelle B.4: TS-, oTS- und CSB-Konzentrationen sowie spezifische Gasbildung der Pressate - Maissilage

Variante	TS [%]		oTS [%]		CSB [mg O ₂ /l]		GB10 [Nl/kg oTS]	
	MW	STABW	MW	STABW	MW	STABW	MW	STABW
St0000/00	5,47	0,13	81,02	2,01	75.100	6.930	95,9	35,6
St0000/50	5,81	0,04	85,35	1,20	76.400	4.104	92,6	17,3
St0000/90	7,76	0,09	83,74	1,96	92.733	8.056	109,6	18,7
St5040/00	4,81	0,07	88,16	0,84	67.067	4.168	151,6	20,1
St5040/90	5,94	0,04	83,97	1,12	80.467	1.361	137,2	37,5
St5090/00	5,10	0,15	79,59	1,79	72.300	6.664	140,7	16,7
St5090/90	5,50	0,08	87,31	1,27	76.900	1.131	111,8	19,4
St0000/00-0,5	8,21	0,03	89,63	1,08	106.667	4.614	100,2	9,6
St0000/00-2	4,27	0,04	84,00	1,05	58.600	872	206,0	13,8
St-UB	4,05	0,07	85,56	0,34	58.700	4.101	99,6	12,8
Sc0000/90	14,27	0,62	95,45	0,16	153.050	5.445	213,6	14,8
Sc5040/00	10,29	0,44	93,74	0,26	119.250	13.081	161,5	12,9
Sc5040/90	14,56	0,56	94,47	0,71	167.550	23.688	218,5	18,0
Sc5090/00	10,69	0,90	93,73	0,25	138.700	15.526	224,5	8,0
Sc5090/90	13,75	0,44	95,10	0,18	179.400	20.082	164,6	11,3
Sc-UB	13,30	0,76	93,53	0,39	98.950	12.374	131,8	7,7
Sc0000/00-2	7,58	0,32	94,92	0,21	94.150	5.445	279,9	44,1
Sc0000/90-2	8,76	0,10	94,99	0,20	88.700	13.435	244,2	36,4
Sc5040/50-2	7,58	0,29	94,80	0,15	93.550	2.475	261,8	14,6
Sc5090/00-2	7,49	0,47	93,82	0,12	92.550	4.313	234,6	23,4
Sc5090/90-2	8,18	0,54	94,26	0,89	93.300	9.192	229,2	53,5
Ma00-120	6,82	0,30	93,21	0,13	74.263	2.121	189,9	14,9
Ma00-360	7,04	0,10	92,99	0,29	76.414	4.610	188,5	26,40
Ma00-960	6,87	0,62	90,96	0,20	65.363	15.445	187,2	3,31
Ma50-120	7,01	0,25	93,20	0,41	83.619	3.458	241,4	11,63
Ma50-360	6,18	1,10	91,85	1,13	61.712	1.337	145,8	15,12
Ma50-960	7,42	0,19	90,42	0,68	81.533	1.337	269,2	18,89
Ma90-120	8,76	1,94	94,47	0,24	99.006	10.097	329,9	46,95
Ma90-360	8,37	0,09	93,21	0,93	87.009	1.982	290,1	36,11

Tabelle B.5: TS-, oTS- und CSB-Frachten sowie Gasbildung der Pressate - Maisilage

Variante	Pressat/Mg Silage [kg]	TS STABW	TS-Fracht [kg]	Mg Silage STABW	TS TS	oTS-Fracht [kg]	Mg Silage STABW	TS TS	CSB-Fracht/Mg Silage [kg O ₂]	TS STABW	TS TS	GB10/Mg Silage [m ³]	TS STABW
St0000/00	2610,2	136,4	142,8	19,7	115,7	16,2	196,0	20,8	11,1	4,2			
St0000/50	2797,8	40,4	162,4	6,6	138,6	6,0	213,8	11,9	12,8	2,5			
St0000/90	1502,8	221,3	116,7	26,2	97,7	22,0	139,4	31,3	10,7	5,1			
St5040/00	2686,0	89,3	129,2	9,9	113,9	8,8	180,1	13,3	17,3	7,4			
St5040/90	2026,9	75,0	120,3	19,0	101,0	16,0	163,1	25,2	13,9	4,6			
St5090/00	2584,1	106,7	131,8	19,7	104,9	15,8	186,8	17,5	14,8	7,6			
St5090/90	2674,3	9,7	147,1	20,5	128,4	18,0	205,7	24,1	14,4	5,7			
St0000/00-0,5	1433,2	19,6	117,6	9,3	105,4	8,4	152,9	13,2	10,6	4,2			
St0000/00-2	5824,7	157,6	248,8	10,4	209,0	9,1	341,3	5,1	43,1	3,7			
St-UB	2959,3	78,3	119,9	9,6	102,6	8,2	173,7	13,7	10,2	11,4			
Sc0000/90	3348,7	330,1	477,9	53,0	456,2	50,6	512,5	53,7	97,4	16,4			
Sc5040/00	3567,4	128,2	367,0	20,6	344,0	19,4	425,4	49,1	55,5	0,9			
Sc5040/90	3247,3	100,8	472,8	23,4	446,7	14,3	544,1	78,8	97,6	8,3			
Sc5090/00	3956,6	0,4	423,0	35,5	366,5	1,1	548,8	61,4	89,0	3,2			
Sc5090/90	2744,5	132,5	377,3	21,9	358,8	20,8	492,4	60,0	59,0	3,8			
Sc-UB	3537,6	103,3	470,7	30,3	440,2	13,0	350,1	45,0	58,0	3,4			
Sc0000/00-2	7185,2	141,6	544,5	25,3	516,9	10,3	676,5	41,3	144,7	22,8			
Sc0000/90-2	6716,9	11,0	588,6	15,5	559,1	13,2	595,8	91,3	136,5	31,0			
Sc5040/50-2	6925,2	82,1	525,1	21,3	497,8	20,2	647,8	18,8	130,3	7,5			
Sc5090/00-2	7100,4	193,0	532,0	36,2	499,2	13,6	657,1	35,5	117,1	35,3			
Sc5090/90-2	6572,0	233,3	537,5	40,1	506,7	18,6	613,2	64,2	116,1	27,2			
Ma00-120	6284,3	425,1	428,6	34,6	386,4	27,9	466,7	33,1	75,3	1,8			
Ma00-360	6287,6	337,7	442,5	24,6	411,5	22,1	480,5	34,0	77,5	2,5			
Ma00-960	6582,3	30,4	452,2	41,0	411,3	2,1	430,2	66,5	77,0	1,4			
Ma50-120	6612,1	67,3	463,5	17,1	432,0	4,8	552,9	19,9	104,3	5,0			
Ma50-360	6369,7	176,6	393,9	71,0	361,8	11,0	393,1	12,1	52,7	5,6			
Ma50-960	6402,8	92,0	475,2	13,9	429,7	7,0	522,0	10,2	115,7	8,3			
Ma90-120	6876,3	118,2	602,7	133,8	569,3	126,4	680,8	69,7	187,8	53,6			
Ma90-360	6715,0	199,0	562,2	17,7	524,0	16,4	584,3	20,8	152,0	20,3			

Tabelle B.6: TS- und oTS-Konzentrationen der Pressrückstände - Maissilage

Variante	TS [%]		oTS [%]	
	MW	STABW	MW	STABW
St0000/00	23,32	0,44	94,83	2,21
St0000/50	24,84	0,31	96,23	0,55
St0000/90	18,97	0,33	95,65	0,18
St5040/00	25,08	0,83	95,10	0,53
St5040/90	21,72	0,06	95,39	0,46
St5090/00	23,27	0,38	91,41	2,10
St5090/90	24,40	2,64	95,05	0,42
St0000/00-0,5	25,42	0,81	96,14	0,44
St0000/00-2	22,47	0,28	96,97	0,00
St-UB	26,40	1,01	96,59	0,08
Sc0000/90	40,86	1,62	96,53	0,02
Sc5040/00	36,05	1,44	96,26	0,29
Sc5040/90	35,89	1,55	96,60	0,13
Sc5090/00	35,80	1,23	96,57	0,10
Sc5090/90	40,45	1,34	95,60	0,70
Sc-UB	38,57	1,15	96,70	0,25
Sc0000/00-2	41,05	0,93	97,12	0,06
Sc0000/90-2	37,08	1,03	97,09	0,44
Sc5040/50-2	40,40	1,78	97,12	0,19
Sc5090/00-2	40,01	1,49	96,80	0,19
Sc5090/90-2	38,61	1,08	96,71	0,16
Ma00-120	45,68	3,78	97,15	0,09
Ma00-360	39,07	0,80	96,93	0,30
Ma00-960	38,92	0,82	96,61	0,26
Ma50-120	39,78	1,55	96,74	0,78
Ma50-360	38,52	1,12	96,28	0,81
Ma50-960	35,09	0,12	95,54	0,08
Ma90-120	44,53	1,03	96,56	0,35
Ma90-360	46,74	2,52	96,70	0,13

B.2.2 Versuchsergebnisse - Bioabfall

Tabelle B.7: Outputmasse nach Behandlung und Pressatmassen nach Fest-Flüssig-Trennung - Bioabfall

Variante	Masse nach Behandlung [kg]		Masse Pressat [kg]	
	MW	STABW	MW	STABW
WA0000/00-2	111,0	0,6	85,6	0,9
WA0000/90-2	110,0	3,7	83,9	2,5
WA0000/90	67,8	6,4	49,6	7,4
WA5090/90	69,4	1,7	50,4	1,6
BS0000/00-2	111,8	1,2	95,0	0,8
BS0000/00-2b	108,9	0,7	96,1	4,0
BS0000/50-2	112,3	0,1	95,1	3,5
BS0000/90-2	110,3	1,9	95,3	1,7

Tabelle B.8: TS-, oTS- und CSB-Konzentrationen sowie spezifische Gasbildung der Pressate - Bioabfall

Variante	TS [%]		oTS [%]		CSB [mg O_2 /l]		GB10 [Nl/kg oTS]	
	MW	STABW	MW	STABW	MW	STABW	MW	STABW
WA0000/00-2	5,56	0,10	64,44	0,64	31.123	4.204	262,50	58,83
WA0000/90-2	4,77	0,05	65,50	1,40	29.480	3.213	157,25	16,19
WA0000/90	7,57	0,90	76,70	0,76	69.894	7.838	450,00	101,00
WA5090/90	10,09	0,10	74,73	1,36	79.153	8.784	673,00	455,94
BS0000/00-2	3,31	0,28	78,16	0,06	30.306	3.363	270,15	68,52
BS0000/00-2b	3,61	0,07	78,24	0,08	27.531	5.082	174,48	17,74
BS0000/50-2	3,42	0,29	78,06	0,11	34.063	707	199,26	20,48
BS0000/90-2	2,65	0,34	79,95	0,05	30.063	3.801	190,04	20,19

Tabelle B.9: TS-, oTS- und CSB-Frachten sowie Gasbildung der Pressate - Maissilage

Variante	Pressat / [kg]	Mg Silage TS STABW	TS-Fracht [kg]	Mg Silage TS STABW	oTS-Fracht [kg]	Mg Silage TS STABW	CSB-Fracht / [kg O ₂]	Mg Silage TS STABW	GB 10 / [m ³]	Mg Silage TS STABW
WA0000/00-2	6.177,1	199,7	343,7	12,6	221,5	8,4	192,2	26,7	58,1	13,2
WA0000/90-2	6.057,9	260,6	289,1	12,9	189,4	9,3	178,6	20,9	29,8	3,4
WA0000/90	3.577,7	547,1	271,0	52,4	207,9	40,2	250,1	47,4	93,5	27,7
WA5090/90	3.635,5	161,5	367,0	16,7	274,2	13,4	287,8	34,4	184,6	125,4
BS0000/00-2	7.597,6	241,4	251,3	22,5	196,4	17,6	230,3	26,6	53,1	14,3
BS0000/00-2b	7.681,6	398,4	277,4	15,4	217,0	12,1	211,5	40,6	37,9	4,4
BS0000/50-2	7.605,6	365,7	259,7	25,6	202,8	20,0	259,1	13,6	40,4	5,7
BS0000/90-2	7.621,6	269,1	201,7	27,2	161,3	21,7	229,1	30,1	30,7	5,3

B.2.3 Extraktionsergebnisse - Maissilage

Tabelle B.10: Anteilige Extraktion organischer Inhaltsstoffe aus den Ausgangssubstraten in das Pressat - Maissilage

Variante	oTS-Extraktion		CSB-Extraktion		GB-10-Extraktion	
	[%]	STABW	[%]	STABW	[%]	STABW
St0000/00	12,1	1,7	19,1	2,0	4,3	1,6
St0000/50	14,5	0,6	20,8	1,2	4,9	1,0
St0000/90	10,2	2,3	13,6	3,0	4,1	2,0
St5040/00	11,9	0,9	17,5	1,3	6,6	2,8
St5040/90	10,5	1,7	15,9	2,5	5,3	1,8
St5090/00	10,9	1,7	18,2	1,7	5,7	2,9
St5090/90	13,4	1,9	20,0	2,3	5,5	2,2
St0000/00-0,5	11,0	0,9	14,9	1,3	4,1	1,6
St0000/00-2	21,8	0,9	33,3	0,5	16,6	1,4
St-UB	10,7	0,9	16,9	1,3	3,9	4,4
Sc0000/90	47,5	5,3	48,4	5,1	38,5	6,5
Sc5040/00	35,8	2,0	40,2	4,6	21,9	0,3
Sc5040/90	46,5	1,5	51,4	7,4	38,5	3,3
Sc5090/00	41,3	0,1	51,9	5,8	35,1	1,2
Sc5090/90	37,3	2,2	46,5	5,7	23,3	1,5
Sc-UB	45,8	1,4	33,1	4,2	22,9	1,4
Sc0000/00-2	53,9	1,1	65,2	4,0	54,1	8,5
Sc0000/90-2	58,3	1,4	57,4	8,8	51,0	11,6
Sc5040/50-2	51,9	2,1	62,4	1,8	48,7	2,8
Sc5090/00-2	52,0	1,4	63,3	3,4	43,8	13,2
Sc5090/90-2	52,8	1,9	59,1	6,2	43,4	10,2
Ma00-120	41,5	2,9	44,8	3,2	28,9	0,7
Ma00-360	43,0	2,3	46,1	3,3	29,8	0,9
Ma00-960	42,9	0,2	41,8	6,5	30,6	0,6
Ma50-120	45,1	0,5	53,2	1,9	39,2	1,9
Ma50-360	37,8	1,1	38,2	1,2	20,9	2,2
Ma50-960	44,9	0,7	50,2	1,0	43,4	3,1
Ma90-120	59,5	13,2	65,4	6,7	72,1	20,6
Ma90-360	54,8	1,7	56,1	2,0	58,3	7,8

B.2.4 Extraktionsergebnisse - Bioabfall

Tabelle B.11: Anteilige Extraktion organischer Inhaltsstoffe aus den Ausgangssubstraten in das Pressat - Bioabfall

Variante	oTS-Extraktion		CSB-Extraktion		GB-10-Extraktion	
	[%]	STABW	[%]	STABW	[%]	STABW
WA0000/00-2	32,7	1,2	23,8	3,3	33,9	7,7
WA0000/90-2	28,0	1,4	22,1	2,6	17,4	2,0
WA0000/90	30,7	5,9	30,9	5,9	54,6	16,2
WA5090/90	40,5	2,0	35,6	4,3	107,7	73,1
BS0000/00-2	25,9	2,3	28,5	3,3	24,1	6,5
BS0000/00-2b	28,6	1,6	26,1	5,0	17,2	2,0
BS0000/50-2	26,7	2,6	32,0	1,7	18,4	2,6
BS0000/90-2	21,3	2,9	28,3	3,7	13,9	2,4

B.2.5 Auswirkungen der einzelnen Prozessparameter - Maissilage

Auswirkung der Prozesswassermasse auf die Extraktionsleistung - Maissilage

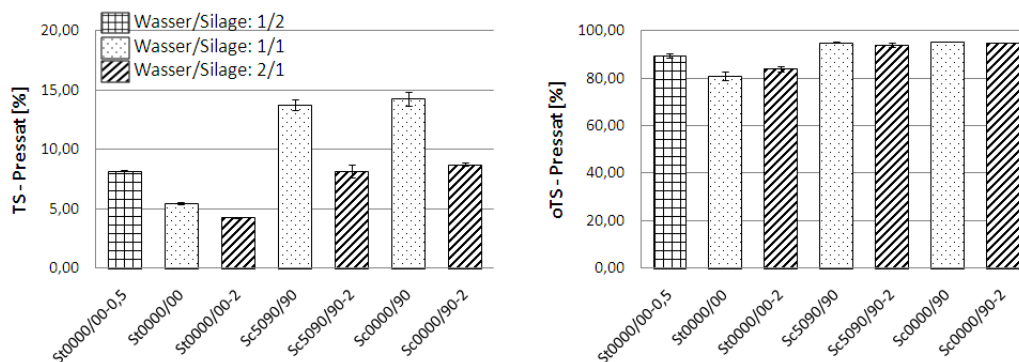


Abbildung B.1: Einfluss der Prozesswassermasse auf den TS- und oTS-Gehalt des Pressats

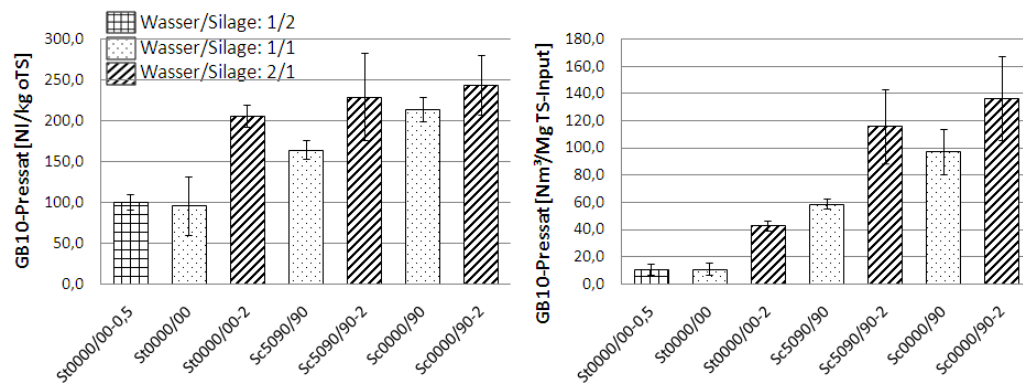


Abbildung B.2: Einfluss der Prozesswassermasse auf die Gasausbeute aus dem Pressat

Auswirkung der Intensität der Vakuum-Siede-Behandlung auf die Extraktionsleistung - Maissilage

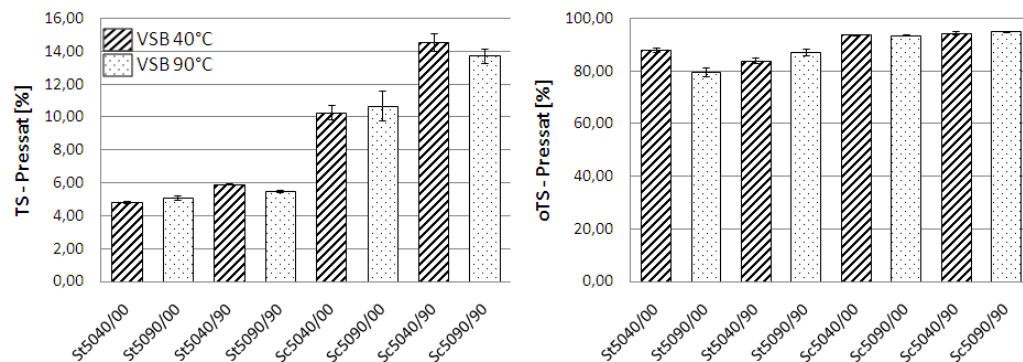


Abbildung B.3: Einfluss der Vakuum-Siede-Behandlung auf den TS- und oTS-Gehalt des Pressats

Auswirkung der Intensität der Maisch-Behandlung auf die Extraktionsleistung - Maissilage

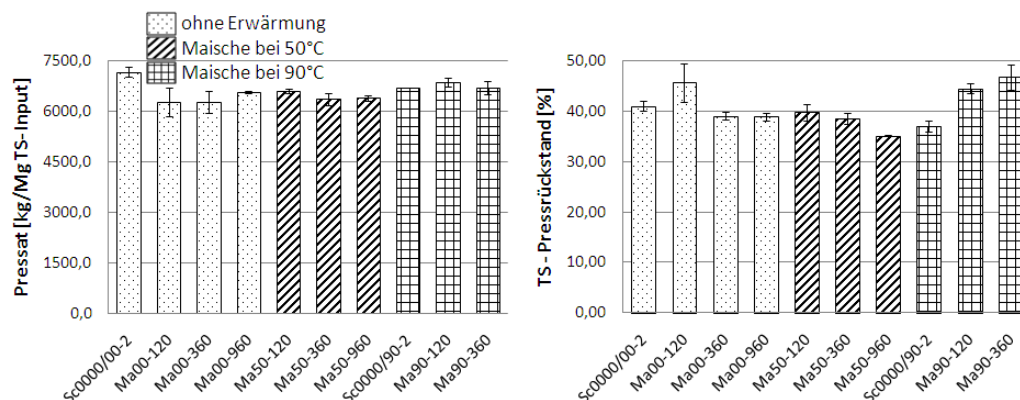


Abbildung B.4: Einfluss der Intensität der Maisch-Behandlung auf die Pressatausbeute und den TS-Gehalt des Pressrückstandes

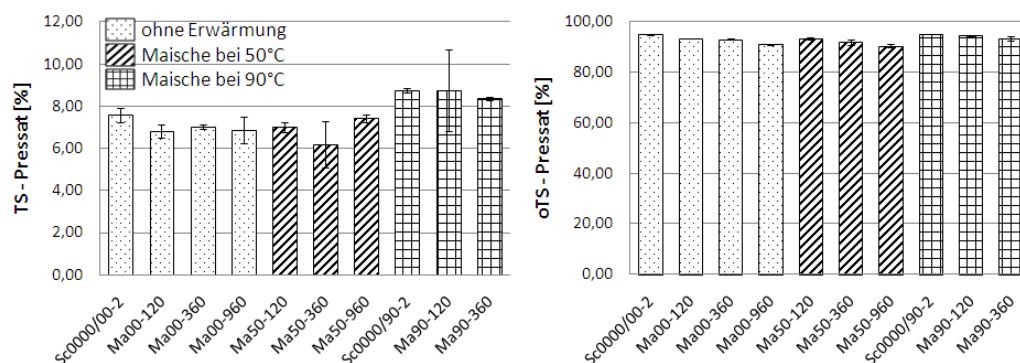


Abbildung B.5: Einfluss der Intensität der Maisch-Behandlung auf den TS- und oTS-Gehalt des Pressats

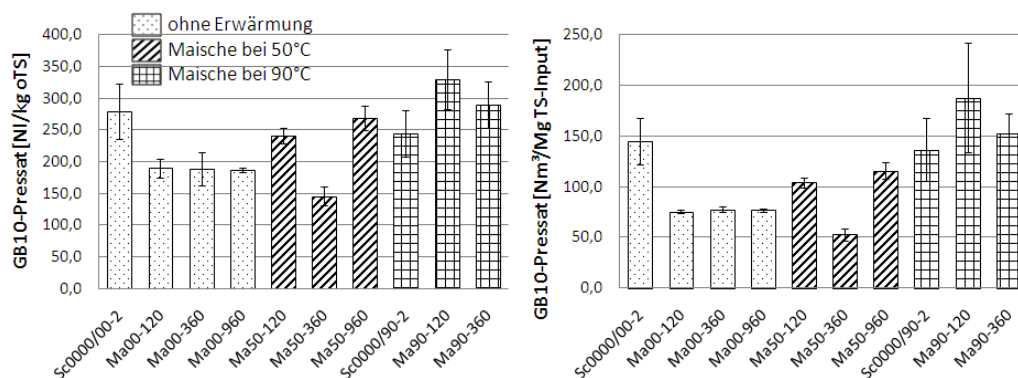


Abbildung B.6: Einfluss der Intensität der Maisch-Behandlung auf die Gasausbeute aus dem Pressat

Auswirkung der Intensität der Vakuum-Siede-Behandlung und Maischbehandlung auf die Extraktionsleistung - Maissilage

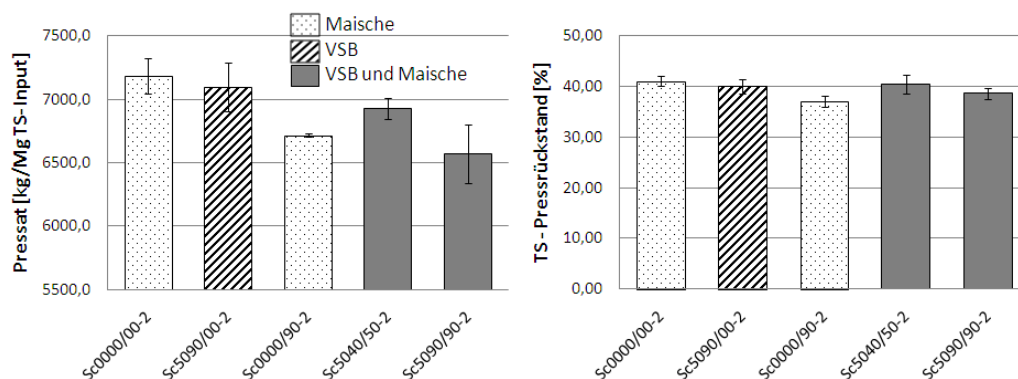


Abbildung B.7: Einfluss der Intensität der Vakuum-Siede- und Maisch-Behandlung auf die Pressatausbeute und den TS-Gehalt des Pressrückstandes - Wasser/Silage:

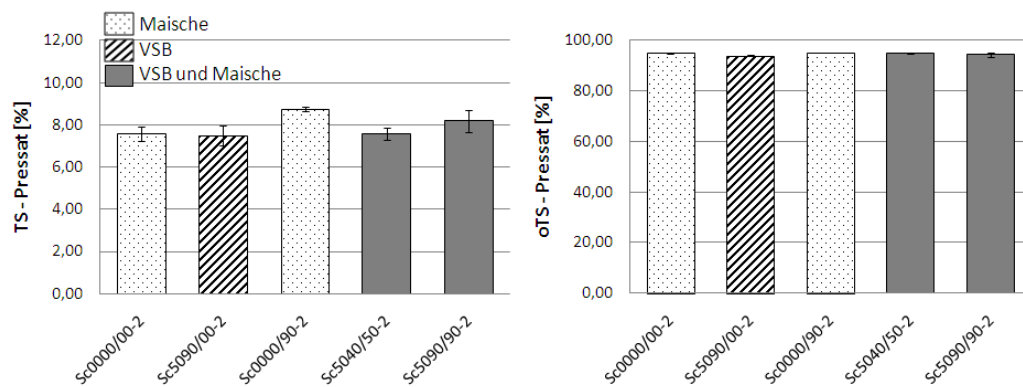


Abbildung B.8: Einfluss der Intensität der Vakuum-Siede- und Maisch-Behandlung auf den TS- und oTS-Gehalt des Pressats - Wasser/Silage: 2/1

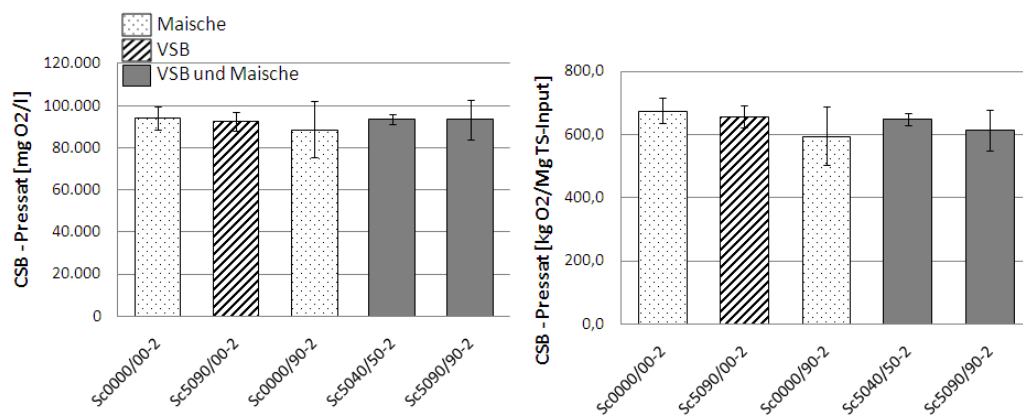


Abbildung B.9: Einfluss der Intensität der Vakuum-Siede- und Maisch-Behandlung auf den CSB-Gehalt und die CSB-Fracht des Pressats - Wasser/Silage: 2/1

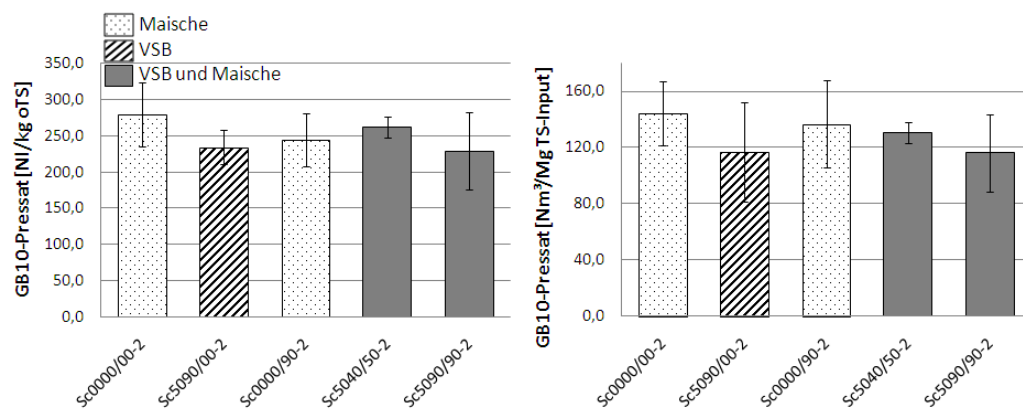


Abbildung B.10: Einfluss der Intensität der Vakuum-Siede- und Maisch-Behandlung auf die Gasausbeute aus dem Pressat - Wasser/Silage: 2/1

B.2.6 Auswirkungen der Prozessparameter - Bioabfall

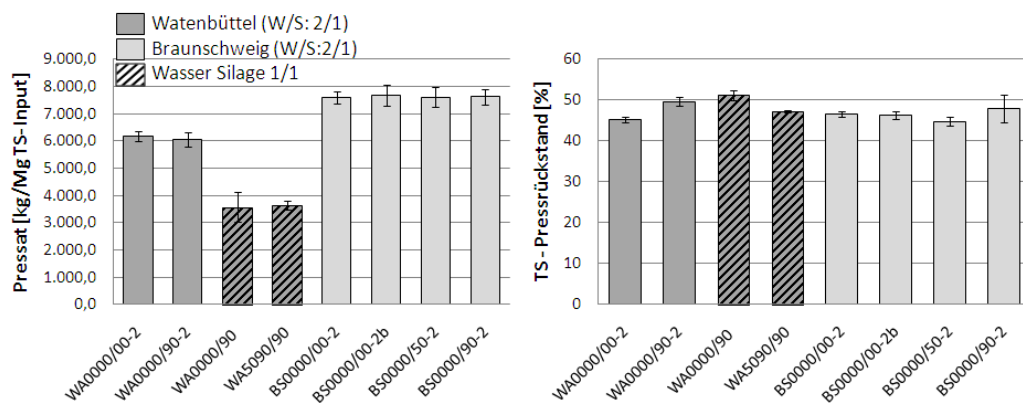


Abbildung B.11: Einfluss des Behandlungsverfahrens auf die Pressatausbeute und den TS-Gehalt des Pressrückstandes

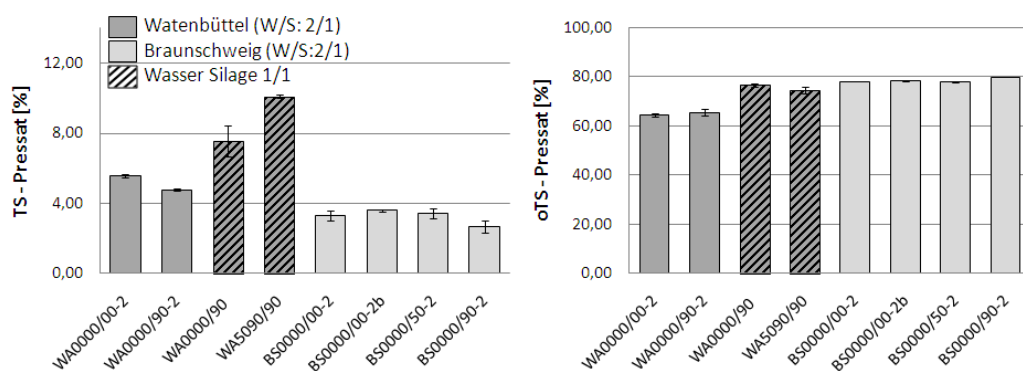


Abbildung B.12: Einfluss des Behandlungsverfahrens auf den TS- und oTS-Gehalt des Pressats

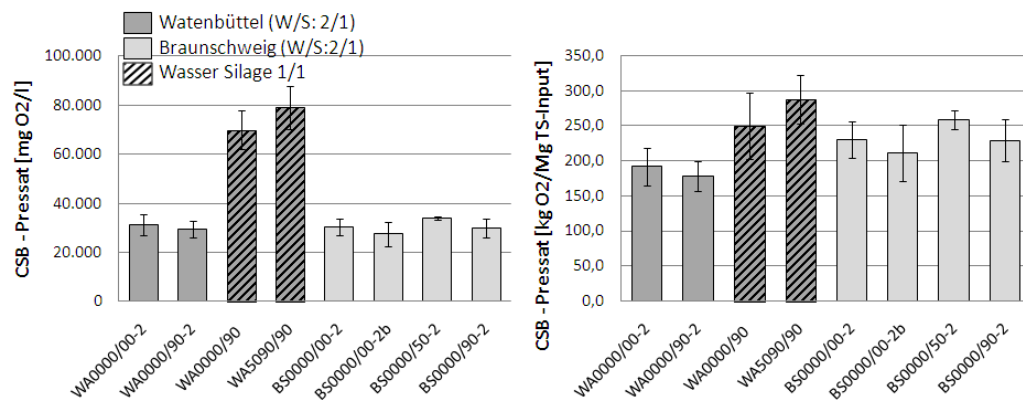


Abbildung B.13: Einfluss des Behandlungsverfahrens auf den CSB-Gehalt und die CSB-Fracht des Pressats

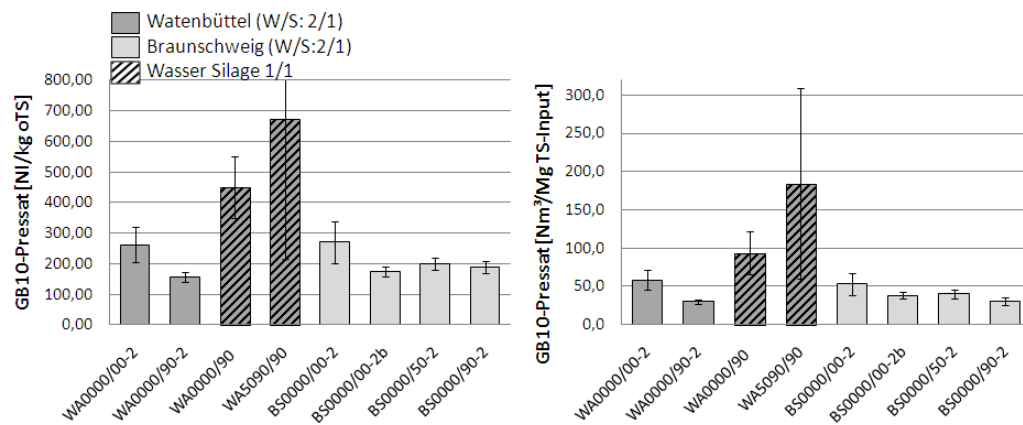


Abbildung B.14: Einfluss des Behandlungsverfahrens auf die Gasausbeute aus dem Pressat

B.2.7 Zusatzversuche

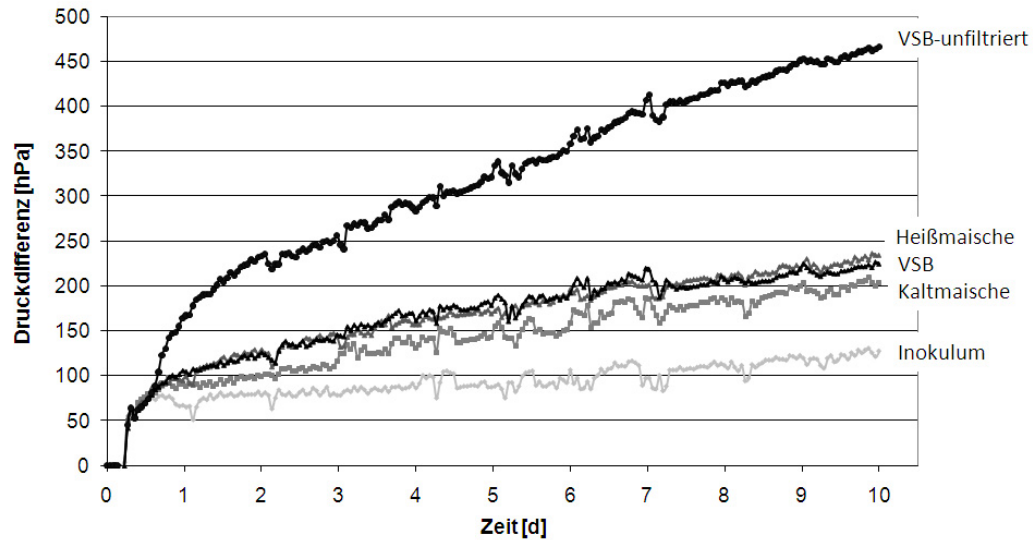


Abbildung B.15: Gasbildungsaktivität der filtrierten Silage-Pressate nach unterschiedlich intensiver Vorbehandlung (Wasser/Silage: 1/1)

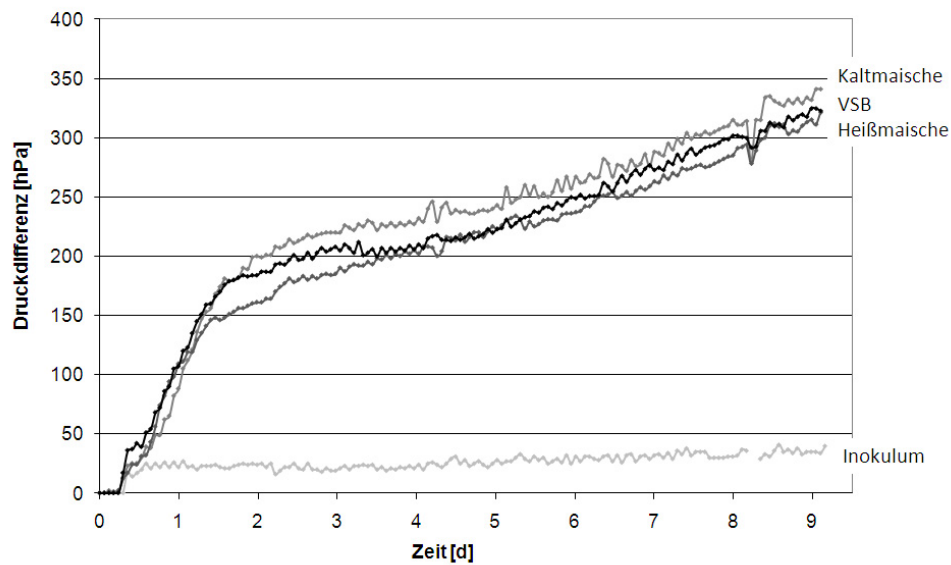


Abbildung B.16: Gasbildungsaktivität der unfiltrierten Silage-Pressate nach unterschiedlich intensiver Vorbehandlung (Wasser/Silage: 2/1)

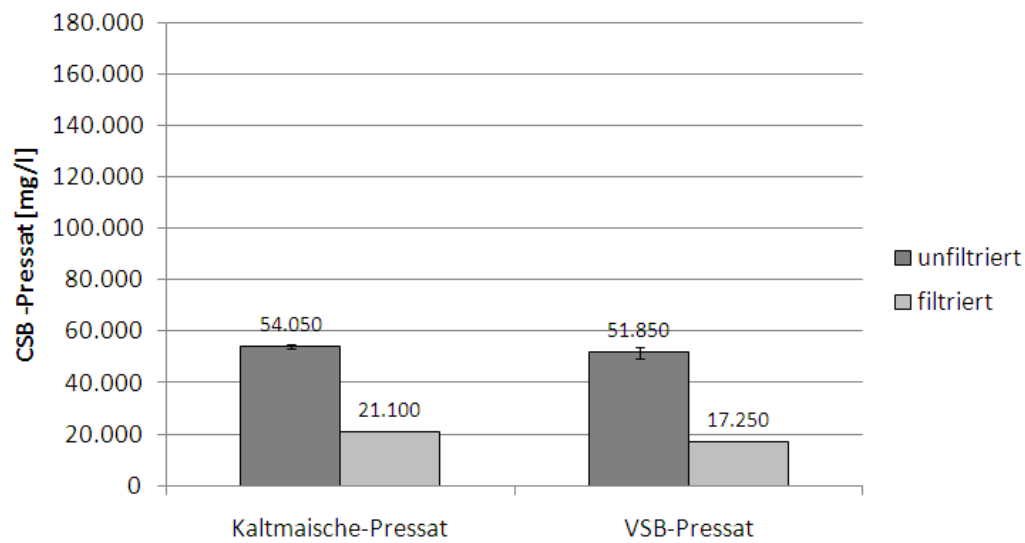


Abbildung B.17: CSB-Konzentrationen der Bioabfall-Pressate nach unterschiedlich intensiver Vorbehandlung - filtriert und unfiltriert (Wasser/Bioabfall: 2/1)

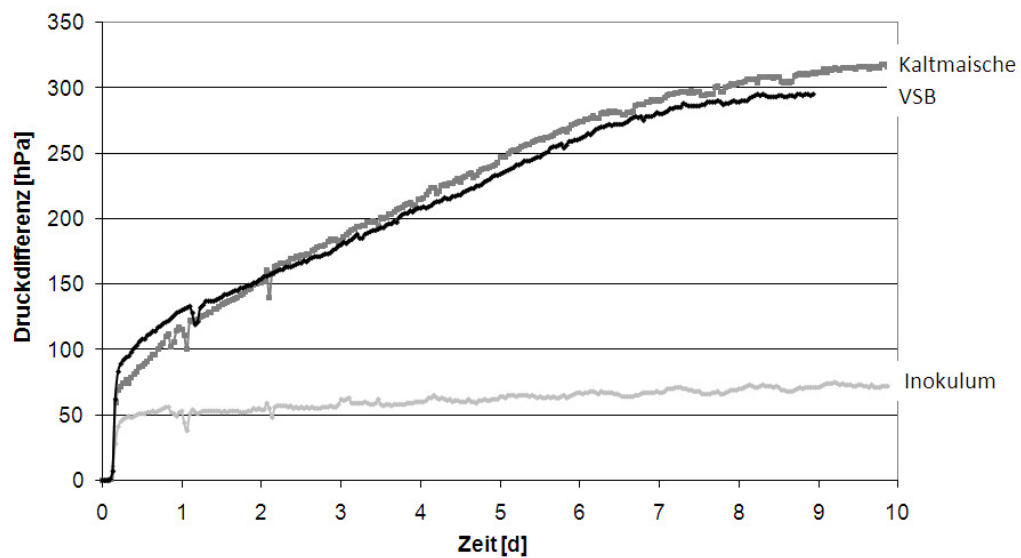


Abbildung B.18: Gasbildungsaktivität der unfiltrierten Bioabfall-Pressate nach unterschiedlich intensiver Vorbehandlung (Wasser/Bioabfall: 2/1)

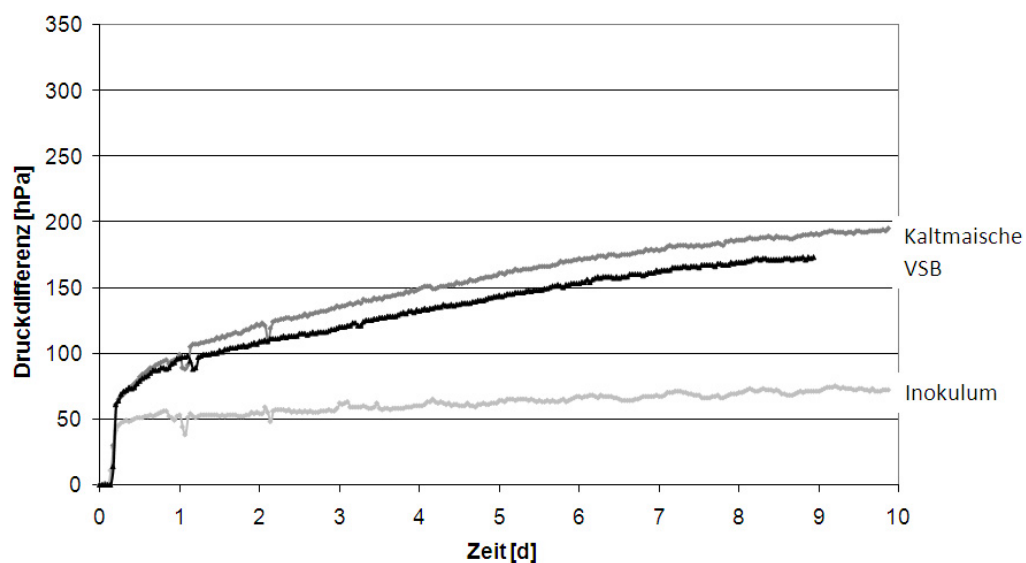


Abbildung B.19: Gasbildungsaktivität der filtrierten Bioabfall-Pressate nach unterschiedlich intensiver Vorbehandlung (Wasser/Bioabfall: 2/1)

Tabelle B.12: CSB-Konzentrationen der Pressate aus den Zusatzuntersuchungen - unfiltriert und filtriert

Variante	CSB unfiltriert [mg O ₂ /l]		CSB filtriert [mg O ₂ /l]	
	MW	STABW	MW	STABW
Wasser/Silage: 1/1				
Kaltmaische-Pressat	144.750	71	50.551	357
Heißmaische-Pressat	153.850	636	52.600	1.131
VSB-Pressat	146.600	424	55.900	424
Wasser/Silage: 2/1				
Kaltmaische-Pressat	74.800	113	36.200	71
Heißmaische-Pressat	66.700	53	39.400	256
VSB-Pressat	70.500	49	36.800	990
Wasser/Bioabfall: 2/1				
Kaltmaische-Pressat	54.050	778	21.100	141
VSB-Pressat	51.850	2.192	17.250	71

B.2.8 Energieverbrauch - Maissilage

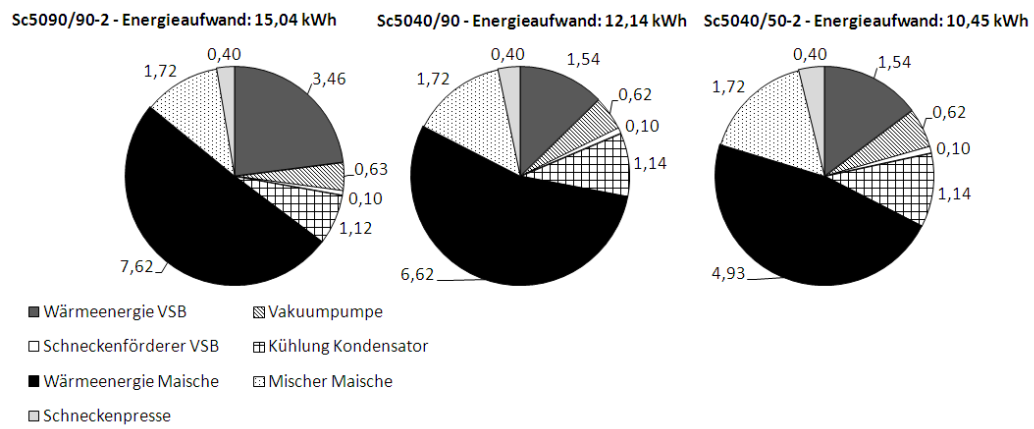


Abbildung B.20: Energieverbrauch der Versuchsvarianten Sc5090/90-2, Sc5040/90 und Sc5040/50-2 [kWh]

Anhang C

Labortechnische Versuche

C.1 Vorversuche

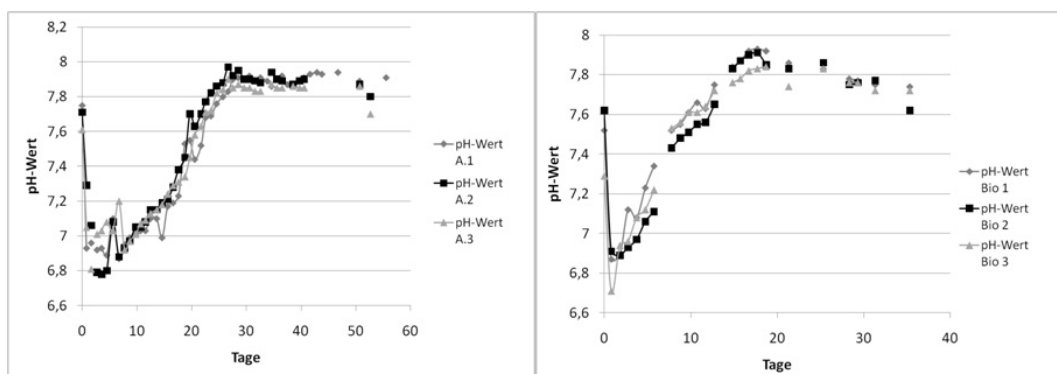


Abbildung C.1: Verlauf des pH-Wertes der Versuchswiederholungen über die Dauer der Gärversuche (links Mischsubstrat, rechts Bioabfall)

C.2 Summenparameter der Inputanalysen

Tabelle C.1: TS- und oTS-Gehalte der verwendeten Substrate und Inokula aller Versuchsreihen - labortechnische Versuche, Mittelwerte und Standardabweichungen (σ)

Substrate	V.1 TS-Geh. [%] - (STABW)	V.1 oTS-Geh. [%] - (STABW)	V.2 TS-Geh. [%] - (STABW)	V.2 oTS-Geh. [%] - (STABW)	V.3 TS-Geh. [%] - (STABW)	V.3 oTS-Geh. [%] - (STABW)
Kohl	9,85 (0,08)	89,06 (0,18)	6,59 (0,07)	88,82 (0,72)	8,48 (0,49)	90,42 (0,02)
Karotte	8,36 (0,51)	87,09 (0,16)	8,32 (0,3)	91,87 (1,92)	10,8 (0,4)	92,25 (0,05)
Kartoffel	20,92 (0,24)	90,75 (0,13)	21,44 (1,28)	93,02 (0,71)	18,75 (0,65)	94,7 (0,04)
Apfel	15,04 (0,46)	94,82 (3,78)	10,39 (0,17)	94,43 (1,18)	10,28 (0,29)	95,77 (0,42)
Heu	84,14 (3,56)	94,18 (0,16)	93,08 (0,88)	93,68 (0,19)	82,45 (0,52)	94,02 (0,1)
Biertreber	22,84 (1,31)	89,64 (1,05)	18,83 (0,66)	93,36 (0,52)	19,52 (0,43)	95,93 (0,04)
Obstrestler	11,14 (0,84)	95,1 (0,94)	10,23 (1,2)	94,06 (0,32)	11,74 (0,97)	95,93 (0,17)
Substrate	V.4 TS-Geh. [%] - (STABW)	V.4 oTS-Geh. [%] - (STABW)	V.6 TS-Geh. [%] - (STABW)	V.6 oTS-Geh. [%] - (STABW)		
Kohl	6,09 (0,23)	90,89 (0,18)	8,93 (0,08)	92,08 (0,18)		
Karotte	7,33 (0,07)	90,65 (0,11)	9,00 (0,06)	92,14 (0,26)		
Kartoffel	16,38 (0,08)	95,84 (0,02)	21,58 (0,42)	95,84 (0,26)		
Apfel	9,02 (0,24)	97,26 (0,10)	10,43 (0,15)	97,74 (0,11)		
Heu	76,36 (6,17)	93,97 (0,07)	83,46 (0,43)	92,62 (0,49)		
Biertreber	16,28 (0,41)	95,45 (0,10)	21,10 (0,28)	95,66 (0,16)		
Obstrestler	13,7 (0,97)	97,71 (0,05)				
Substrate	V.5 TS-Geh. [%] - (STABW)	V.5 oTS-Geh. [%] - (STABW)	Substrate	TS-Geh. [%] - (STABW)	oTS-Geh. [%] - (STABW)	
Weizenstroh	87,60 (0,39)	95,73 (1,01)	Inokulum V.1	5,8 (0,06)	76,08 (0,34)	
Weizenkorn	88,65 (0,35)	86,70 (0,28)	Inokulum V.2	6,2 (0,25)	78,14 (1,21)	
			Inokulum V.3	5,33 (0,07)	75,01 (0,31)	
			Inokulum V.4	4,92 (0,05)	74,88 (0,23)	
			Inokulum V.5	4,96 (0,07)	75,37 (0,43)	
			Inokulum V.6	6,07 (0,10)	76,64 (0,20)	

Tabelle C.2: TOC-Gehalte der verwendeten Substrate und Inokula aller Versuchsreihen - labortechnische Versuche, Mittelwerte und Standardabweichungen

Substrate	V.1 TOC-Geh. [%] (STABW)	V.2 TOC-Geh. [%] (STABW)	V.3 TOC-Geh. [%] (STABW)	V.4 TOC-Geh. [%] (STABW)	V.6 TOC-Geh. [%] (STABW)
Kohl	40,1 (4,2)	41,1 (1,4)	39,2 (0,4)	38,5 (1,9)	39,8 (1,6)
Karotte	40,5 (1,8)	41,4 (0,8)	39,2 (0,0)	42,9 (0,5)	40,8 (0,5)
Kartoffel	39,4 (0,0)	38,5 (0,4)	35,9 (1,1)	38,3 (0,2)	38,1 (0,2)
Apfel	47,9 (0,7)	47,5 (0,4)	46,7 (0,4)	46,5 (2,2)	47,3 (0,9)
Heu	40,1 (3,0)	40,1 (3,9)	36,8 (0,2)	35,7 (0,7)	37,6 (1,9)
Biertreber	39,3 (1,2)	35,9 (0,3)	36,0 (0,0)	35,1 (1,2)	35,8 (1,0)
Obsttrester	38,3 (2,8)	44,4 (4,8)	36,2 (0,3)	39,2 (0,4)	
Mischung	38,5 (1,2)	41,2 (0,6)	40,0 (0,1)	39,7 (0,2)	40,3 (0,4)
Substrate	V.5 TOC-Geh. [%] (STABW)	Substrate		TOC-Geh. [%] (STABW)	
Weizenstroh	33,9 (3,25)	Inokulum V.1		32,4 (0,8)	
Weizenkorn	39,0 (0,13)	Inokulum V.2		35,0 (0,2)	
		Inokulum V.3		32,4 (0,8)	
		Inokulum V.4		30,2 (0,8)	
		Inokulum V.5		29,7 (1,4)	
		Inokulum V.6		31,2 (0,3)	

Tabelle C.3: CSB-Gehalte der verwendeten Substrate und Inokula aller Versuchsreihen - labortechnische Versuche, Mittelwerte und Standardabweichungen

Substrate	V.1 CSB-Gehalt [mg O ₂ /g TS] (STABW)	V.2 CSB-Gehalt [mg O ₂ /g TS] (STABW)	V.3 CSB-Gehalt [mg O ₂ /g TS] (STABW)	V.4 CSB-Gehalt [mg O ₂ /g TS] (STABW)	V.6 CSB-Gehalt [mg O ₂ /g TS] (STABW)
Kohl	969,7 (7,2)	1021,6 (25,5)	687,9 (24,5)	1417,8 (2,7)	1016,7 (13,8)
Karotte	1094,4 (42,3)	1684,4 (42,9)	784,0 (38,5)	1456,1 (8,4)	1286,4 (24,9)
Kartoffel	988,1 (22,1)	1147,4 (39,6)	864,0 (33,3)	1063,3 (17,4)	998,7 (6,4)
Apfel	1006,2 (23,3)	1564,0 (20,4)	1553,2 (20,2)	1481,4 (7,2)	1421,0 (9,8)
Heu	799,2 (12,6)	722,5 (11,4)	1089,5 (57,6)	1145,9 (35,7)	1005,4 (26,8)
Biertreber	1142,7 (92,9)	1484,9 (63,1)	1534,8 (61,6)	1407,7 (3,2)	1472,3 (53,4)
Obstrestler	1916,6 (57,1)	2116,3 (20,7)	1624,1 (34,4)	1194,3 (56,7)	
Mischung	955,8 (29,8)	1263,0 (27,7)	1469,7 (10,8)	1355,2 (11,2)	1342,6 (14,9)
Substrate	V.5 CSB-Gehalt [mg O ₂ /g TS] (STABW)	Substrate		CSB-Gehalt [mg O ₂ /g TS] (STABW)	
Weizenstroh	1163,2 (18,9)	Inokulum V.1		1354,2 (3,7)	
Weizenkorn	1098,6 (21,9)	Inokulum V.2		1267,7 (3,4)	
Mischung	1283,3 (29,6)	Inokulum V.3		1273,3 (19,3)	
		Inokulum V.4		1597,9 (4,3)	
		Inokulum V.5		1276,6 (3,3)	
		Inokulum V.6		1306,1 (3,6)	

Tabelle C.4: Rohnährstoffgehalt der Einzelkomponenten der Eingangssubstrate, Weizenstroh und -korn gemäß DLG [1997]

Substrate	Rohprotein [% TS]	Rohfett [% TS]	Rohfaser [% TS]	N-freie Extraktions- stoffe [% TS]
Kohl	17,61	0,86	22,17	47,70
Karotte	11,74	0,76	18,16	62,10
Kartoffel	8,42	0,38	5,94	78,64
Apfel	2,89	0,38	8,19	84,40
Heu	11,75	2,19	40,99	39,22
Biertreber	26,06	11,35	28,18	29,49
Obsttrester	7,28	4,53	45,65	38,38
Weizenstroh	3,70	1,30	42,90	44,30
Weizenkorn	15,10	2,40	2,90	77,50

Tabelle C.5: Hemicellulose-, Cellulose- und Lignin-Gehalt der Einzelkomponenten der Eingangssubstrate, Weizenstroh und -korn gemäß DLG [1997]

Substrate	Hemicellulose [% TS]	Cellulose [% TS]	Lignin [% TS]
Kohl	2,34	13,45	8,72
Karotte	2,05	10,51	7,65
Kartoffel	5,12	3,84	2,10
Apfel	1,58	5,64	2,55
Heu	24,34	34,80	6,19
Biertreber	32,74	20,16	8,02
Obsttrester	0,61	31,39	14,26
Weizenstroh	44,30	35,1	7,8
Weizenkorn	9,00	0,60	2,30

Tabelle C.6: Substrateinwaagen der Versuchsvarianten: Frischsubstanz, Trockensubstanz und organische Trockensubstanz - Mittelwerte und Standardabweichungen

	FS-Masse [g] Mittelw.	FS-Masse [g] STABW	TS-Masse [g] Mittelw.	TS-Masse [g] STABW	oTS-Masse [g] Mittelw.	oTS-Masse [g] STABW
MS0015-V1	752,4	1,84	52,7	0,11	42,4	0,09
MS0085-V1	752,0	0,21	52,7	0,01	42,4	0,00
MS5085-V1	751,1	0,56	52,7	0,04	42,4	0,03
MS-I-V1	648,6	2,36	37,6	0,14	28,6	0,10
MS0015-V2	744,3	3,75	53,2	0,24	43,6	0,18
MS0030-V2	743,7	2,00	53,1	0,17	43,5	0,14
MS5030-V2	750,2	3,34	53,6	0,21	43,9	0,16
MS-I-V2	636,2	2,15	39,4	0,13	30,8	0,10
MS0015-V3	807,2	1,42	51,7	0,07	41,5	0,05
MS0085-V3	807,4	3,87	51,7	0,21	41,5	0,16
MS5085-V3	811,9	2,57	51,9	0,14	41,7	0,11
MS-I-V3	703,9	2,57	37,5	0,14	28,1	0,10
MS0015-V4	1046,4	17,13	47,1	0,30	37,7	0,23
MS5040-V4	1038,1	2,92	46,9	0,07	37,5	0,05
MS5085-V4	1044,7	2,04	46,8	0,03	37,4	0,02
MS-I-V4	952,0	0,57	34,5	0,03	25,9	0,02
St0015-V5	999,7	3,27	62,3	0,20	50,4	0,15
St5040-V5	998,2	4,33	62,2	0,19	50,3	0,14
St5085-V5	998,5	2,44	62,1	0,01	50,3	0,01
St-I-V5	794,8	0,04	39,4	0,00	29,7	0,00
MS0015-V6	977,2	26,12	56,6	0,2	45,9	0,2
MS0085-V6	967,0	10,09	56,4	0,5	45,6	0,4
MS5085-V6	959,7	1,09	56,0	0,2	45,3	0,2
MS-I-V6	707,4	8,33	42,9	0,5	32,9	0,4

Tabelle C.7: TOC- und CSB-Konzentrationen sowie TOC- und CSB-Frachten der Versuchsvarianten - Mittelwerte und Standardabweichungen

	TOC-Konz.		TOC-Fracht		TOC-Fracht		CSB-Konz.		CSB-Fracht		CSB-Fracht	
	Mittelw.	STABW	[g]	Mittelw.	[g]	STABW	[mg O ₂ /g TS]	Mittelw.	[mg O ₂ /g TS]	Mittelw.	[mg O ₂]	STABW
MS0015-V1	34,81	0,00	18,36	0,04	1282,3	0,2	67.626,5	151,9				
MS0085-V1	34,81	0,00	18,34	0,00	1282,4	0,0	67.589,6	10,7				
MS5085-V1	34,81	0,00	18,33	0,01	1282,3	0,0	67.522,6	53,6				
MS-I-V1	32,40	0,00	12,19	0,04	1354,2	0,0	50.942,9	185,4				
MS0015-V2	36,54	0,01	19,44	0,08	1321,7	0,2	68.953,1	301,3				
MS0030-V2	36,53	0,01	19,41	0,06	1322,0	0,4	68.867,3	208,8				
MS5030-V2	36,53	0,01	19,57	0,07	1321,2	0,3	69.419,8	260,3				
MS-I-V2	35,00	0,00	13,80	0,05	1279,4	20,2	50.001,0	169,4				
MS0015-V3	34,06	0,00	17,61	0,02	1228,4	0,1	63.505,6	83,4				
MS0085-V3	34,06	0,01	17,61	0,07	1228,5	0,1	63.517,0	263,1				
MS5085-V3	34,05	0,00	17,69	0,05	1228,7	0,1	63.831,0	176,5				
MS-I-V3	32,40	0,00	12,16	0,04	1273,3	0,0	47.769,5	174,7				
MS0015-V4	32,58	0,01	15,33	0,09	1517,7	0,5	71.432,8	473,8				
MS5040-V4	32,58	0,01	15,28	0,02	1517,7	0,2	71.168,6	113,2				
MS5085-V4	32,58	0,00	15,23	0,01	1517,4	0,3	70.946,0	54,5				
MS-I-V4	30,20	0,00	10,43	0,01	1597,9	0,0	55.188,9	44,5				
St0015-V5	32,16	0,01	19,83	0,06	1159,3	0,3	71.947,2	246,5				
St5040-V5	32,17	0,01	19,79	0,06	1159,0	0,4	71.753,7	241,8				
St5085-V5	32,17	0,00	19,78	0,00	1159,0	0,0	71.732,6	8,6				
St-I-V5	29,70	0,00	11,71	0,00	1276,6	0,0	50.325,6	2,7				
MS0015-V6	33,23	0,05	18,82	0,11	1.276,1	2,5	72.283,54	186,99				
MS0085-V6	33,17	0,06	18,71	0,17	1.278,3	0,6	72.112,73	664,04				
MS5085-V6	33,20	0,07	18,60	0,11	1.277,1	1,3	71.568,84	198,15				
MS-I-V6	31,20	0,00	13,39	0,16	1.306,1	0,0	56.041,47	659,90				

C.3 Gasbildungsversuche

Tabelle C.8: Gasbildung der Versuchsvarianten

	Gasvol. Brutto [Nml] Mittelw.	Gasvol. Brutto [Nml] STABW	Gasvol. abzgl. Inokulum [Nml] Mittelw.	Gasvol. abzgl. Inokulum [Nml] STABW	Gasvol. [Nl/kg oTS] Mittelw.	Gasvol. [Nl/kg oTS] STABW
MS0015-V1	9.093	202	7.573	205	548,84	14,56
MS0085-V1	9.513	181	7.990	181	579,61	13,06
MS5085-V1	8.976	307	7.452	305	540,33	22,36
MS-I-V1	1.526	59				
MS0015-V2	9.480	223	7.640	223	603,34	17,71
MS0030-V2	9.546	208	7.706	209	611,60	13,16
MS5030-V2	9.584	443	7.744	444	610,83	34,57
MS-I-V2	1.841	154				
MS0015-V3	8.370	184	7.003	184	522,60	13,58
MS0085-V3	8.370	270	7.002	269	522,45	20,18
MS5085-V3	8.188	510	6.820	510	508,60	37,63
MS-I-V3	1.369	243				
MS0015-V4						
MS5040-V4	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
MS5085-V4						
MS-I-V4						
St0015-V5	10.406	32	8.987	32	453,15	1,74
St5040-V5	10.970	240	9.551	240	481,78	12,25
St5085-V5	10.425	76	9.006	76	454,27	3,76
St-I-V5	1.419	267				
MS0015-V6	8.939	271	7.262	271	622,80	24,39
MS0085-V6	8.936	8	7.130	8	612,09	0,62
MS5085-V6	8.797	283	7.077	278	605,15	23,70
MS-I-V6	1.752	59				

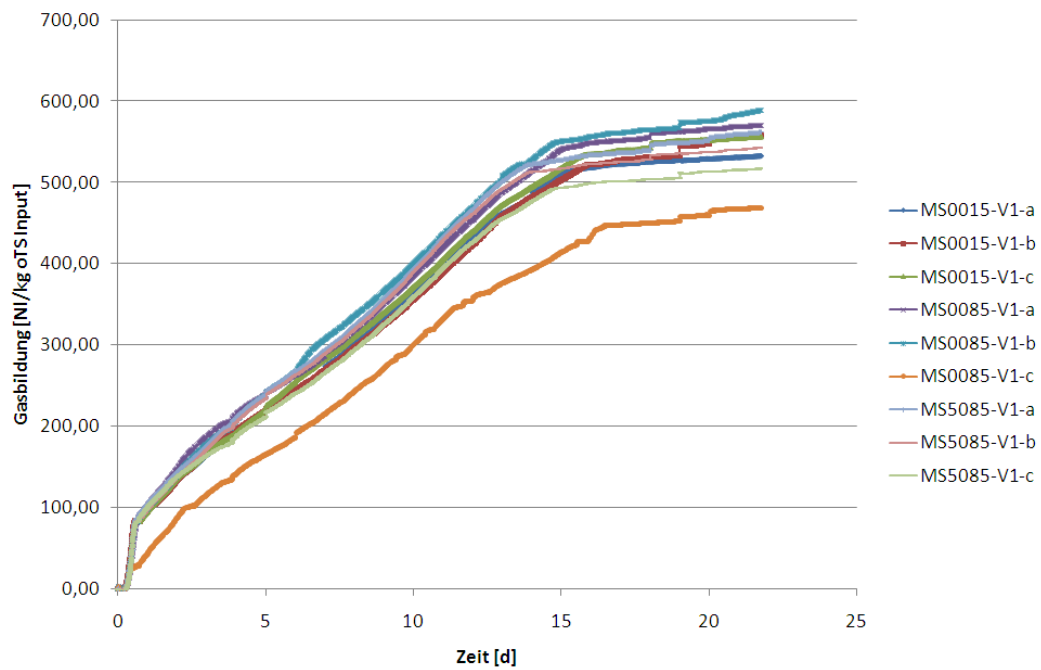


Abbildung C.2: Summenkurven der Biogasbildung, Versuchsreihe V.1 - Einzelansätze

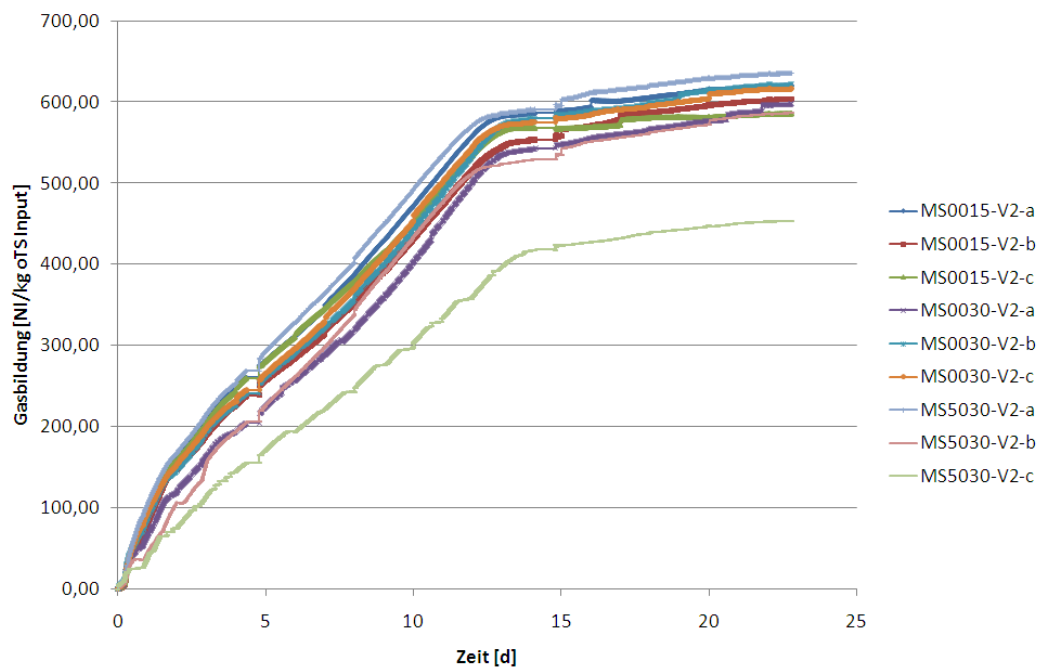


Abbildung C.3: Summenkurven der Biogasbildung, Versuchsreihe V.2 - Einzelansätze

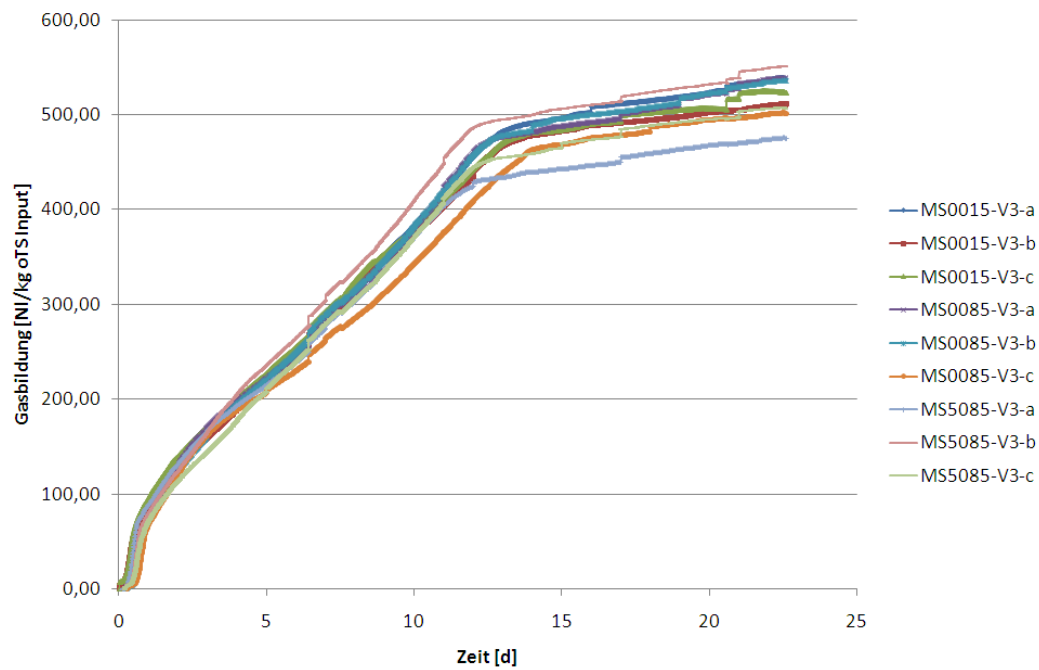


Abbildung C.4: Summenkurven der Biogasbildung, Versuchsreihe V.3 - Einzelansätze

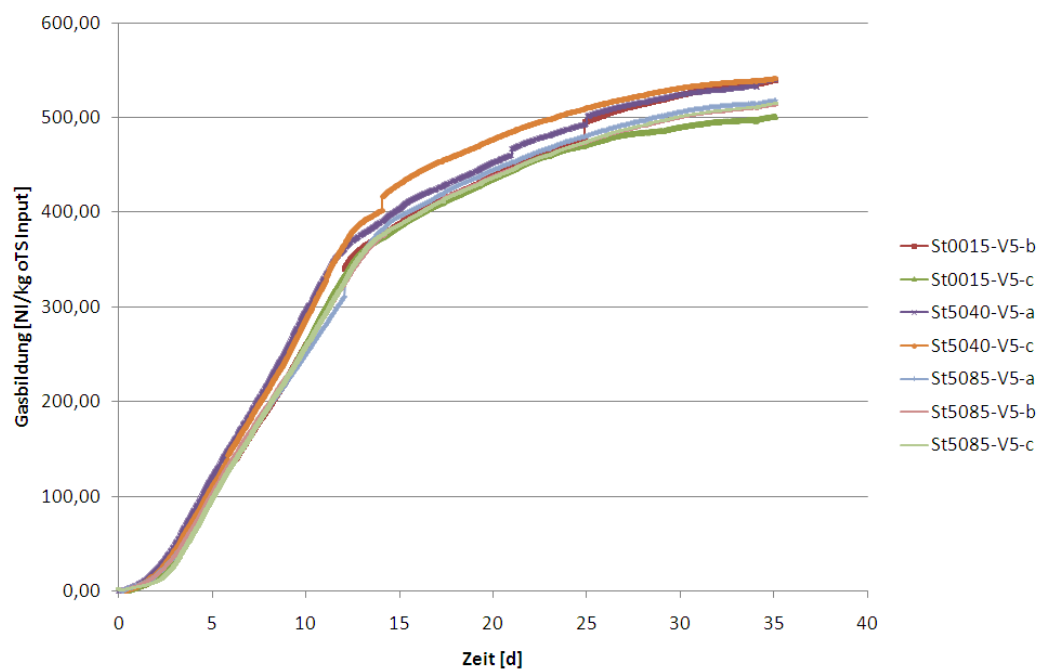


Abbildung C.5: Summenkurven der Biogasbildung, Versuchsreihe V.5 - Einzelansätze

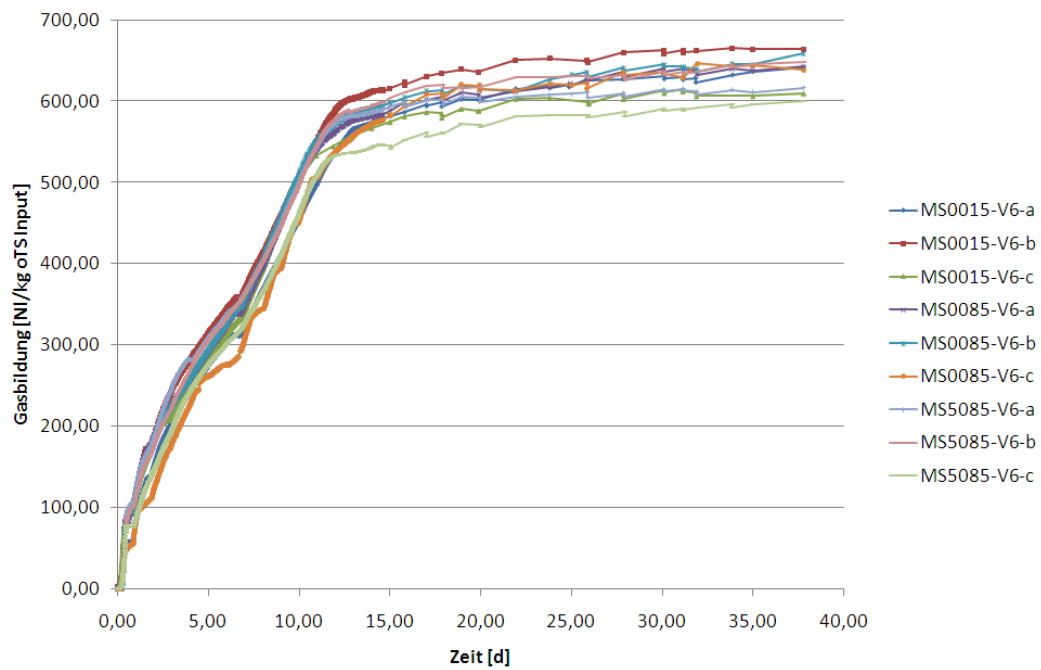


Abbildung C.6: Summenkurven der Biogasbildung, Versuchsreihe V.6 - Einzelansätze

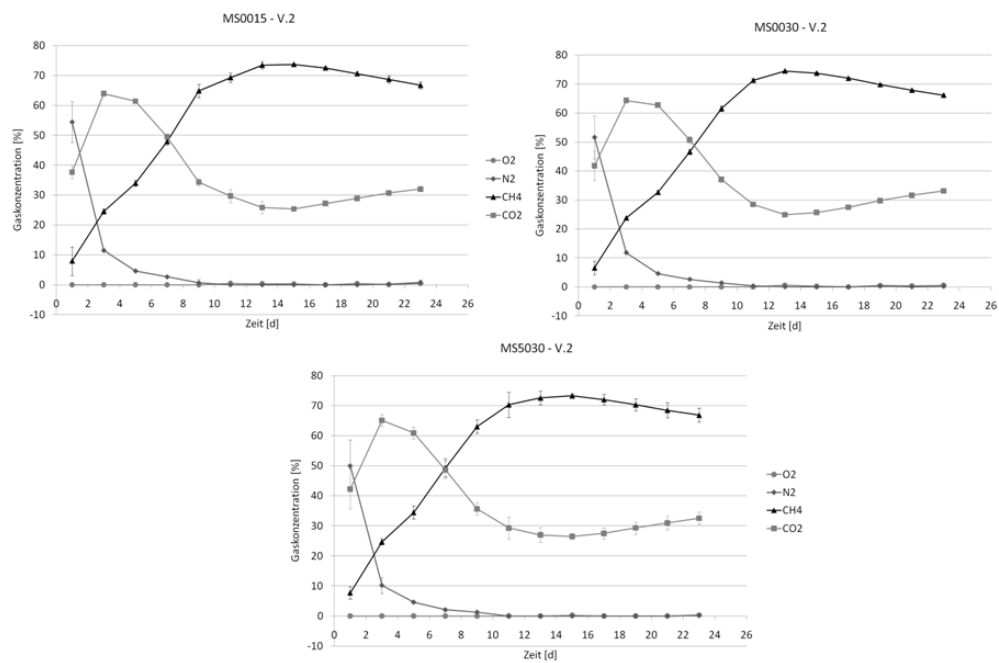


Abbildung C.7: Verlauf der Gaskonzentrationen, Versuchsreihe V.2 - Mittelwerte

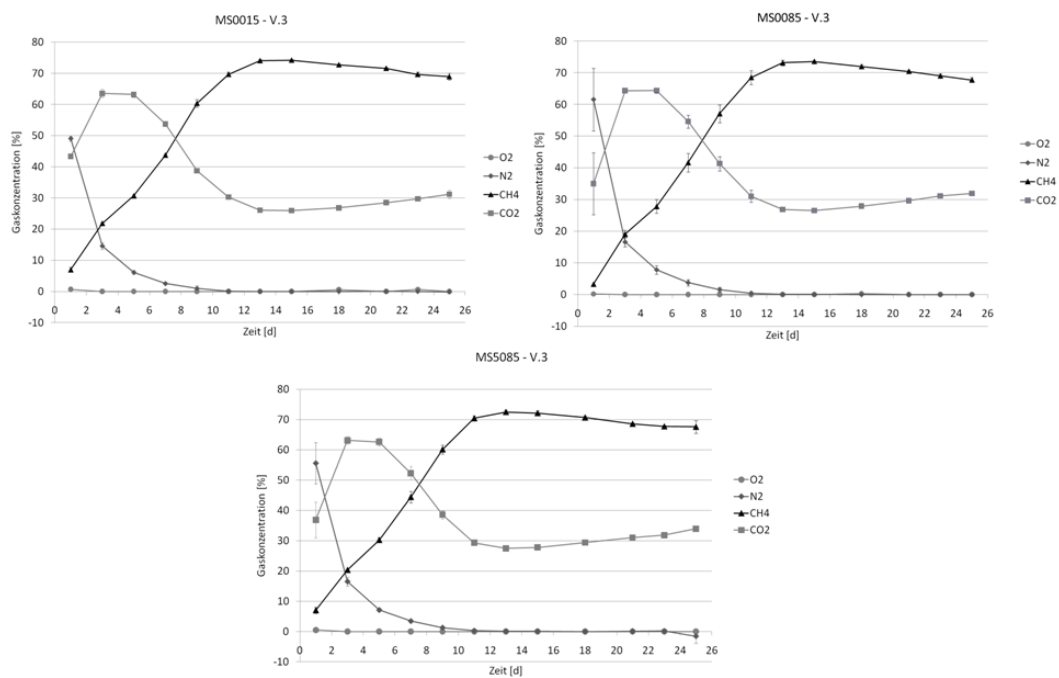


Abbildung C.8: Verlauf der Gaskonzentrationen, Versuchsreihe V.3 - Mittelwerte

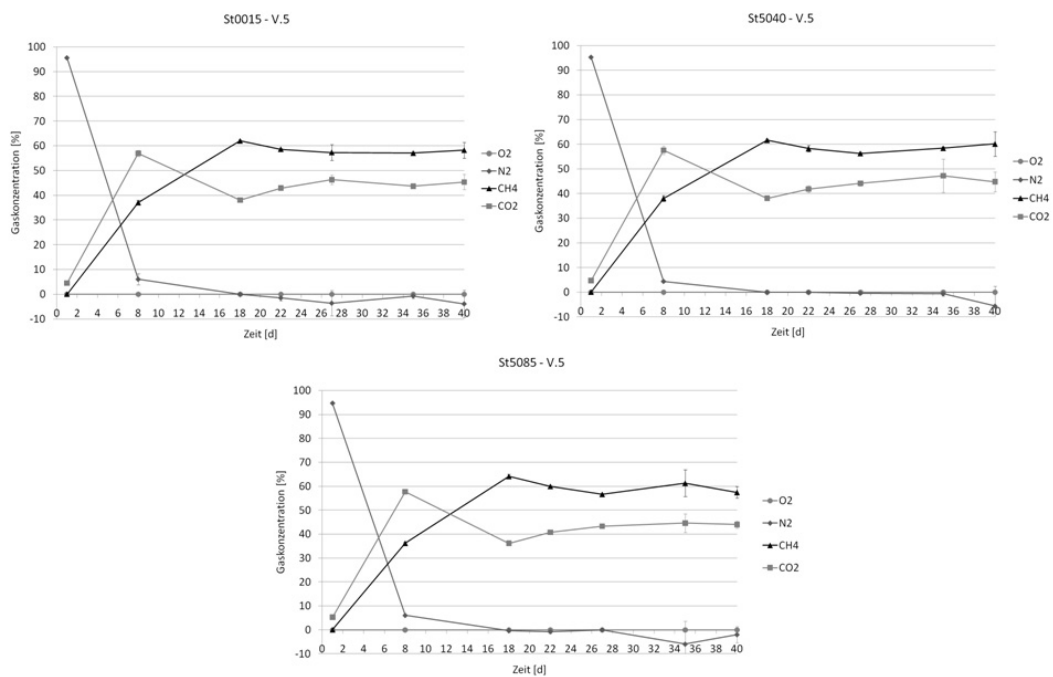


Abbildung C.9: Verlauf der Gaskonzentrationen, Versuchsreihe V.5 - Mittelwerte

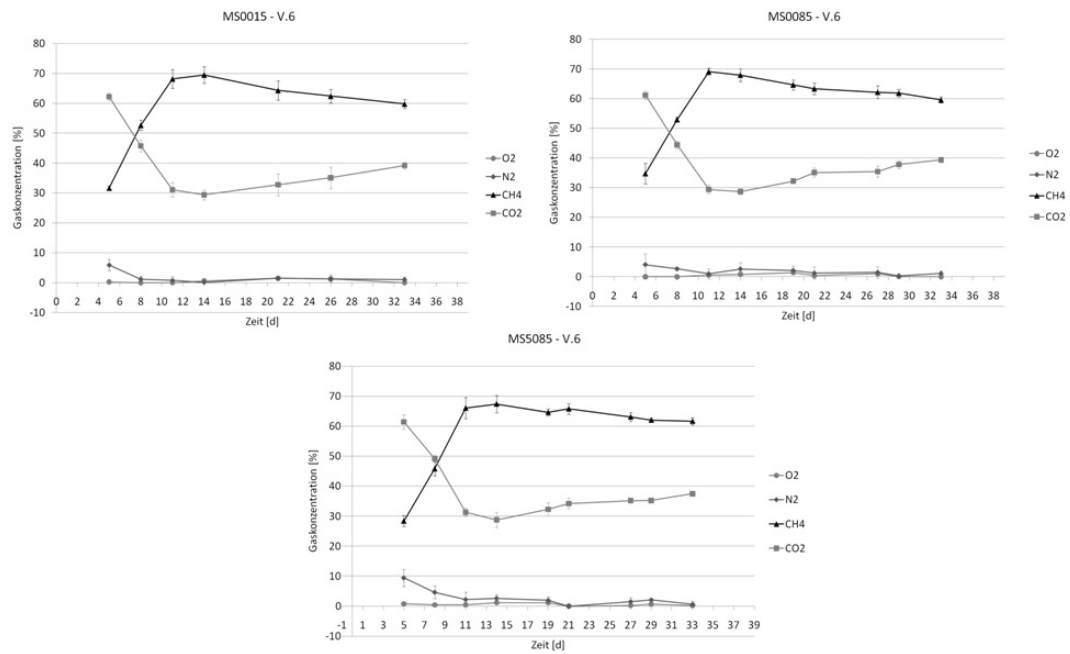


Abbildung C.10: Verlauf der Gaskonzentrationen, Versuchsreihe V.6 - Mittelwerte

C.4 Organischer Abbau - Summenparameter und Outputwerte

Tabelle C.9: oTS-, TOC- und CSB-Abbau der Versuchsvarianten - Mittelwerte und Standardabweichungen

	oTS-Abbau [%]	oTS-Abbau STABW	TOC-Abbau [%]	TOC-Abbau STABW	CSB-Abbau [%]	CSB-Abbau STABW
Vorversuch	73,41	0,30	90,19	4,09	71,01	3,78
MS0015-V1	71,01	3,91	77,46	5,37	76,15	7,91
MS0085-V1	69,00	1,71	73,01	2,07	88,14	1,33
MS5085-V1	72,39	3,09	70,19	6,18	83,82	4,93
MS-I-V1	5,32	0,28	6,78	5,84	15,91	1,07
MS0015-V2	80,39	1,98	84,55	5,58	80,62	2,11
MS0030-V2	88,60	4,81	79,95	7,12	70,68	2,83
MS5030-V2	87,27	1,33	88,96	2,54	75,41	1,98
MS-I-V2	5,56	0,52	9,43	3,25	9,98	0,25
MS0015-V3	78,15	0,24	78,96	8,39	68,40	6,70
MS0085-V3	89,03	6,27	79,33	4,53	81,90	2,55
MS5085-V3	84,94	0,49	84,14	4,08	74,82	1,52
MS-I-V3	3,26	0,55	7,38	0,13	8,81	1,28
MS0015-V4	36,78	4,85	77,37	11,27	78,44	8,06
MS5040-V4	39,88	1,95	80,57	2,48	86,25	7,72
MS5085-V4	26,92	2,94	84,49	5,14	83,24	12,42
MS-I-V4	9,21	0,12	8,79	1,37	13,15	0,13
St0015-V5	85,69	4,13	74,94	9,67	80,89	1,94
St5040-V5	86,82	5,13	75,65	4,62	79,87	6,13
St5085-V5	76,32	2,50	72,73	2,34	78,65	1,95
St-I-V5	8,42	1,81	15,90	1,04	11,23	0,88
MS0015-V6	87,07	4,78	89,33	8,50	77,18	6,87
MS0085-V6	85,03	2,25	90,74	11,19	83,17	7,36
MS5085-V6	74,69	4,38	78,48	8,99	79,61	13,10
MS-I-V6	5,34	2,33	3,20	0,53	9,74	0,17

Tabelle C.10: FS-, TS- und oTS-Frachten nach Vergärungsversuchen

	FS-Fracht [g] Mittelw.	FS-Fracht [g] STABW	TS-Fracht [g] Mittelw.	TS-Fracht [g] STABW	oTS-Fracht [g] Mittelw.	oTS-Fracht [g] STABW
MS0015-V1	737,21	3,01	40,59	0,58	31,11	0,61
MS0085-V1	736,33	1,81	40,93	0,26	31,37	0,23
MS5085-V1	735,08	0,63	40,41	0,47	30,86	0,43
MS-I-V1	647,32	2,61	35,59	0,10	27,10	0,04
MS0015-V2	725,78	5,65	41,37	0,46	31,69	0,42
MS0030-V2	724,77	4,84	40,33	0,80	30,64	0,67
MS5030-V2	729,41	8,08	40,81	0,38	31,10	0,31
MS-I-V2	634,93	1,71	38,00	0,16	29,11	0,14
MS0015-V3	791,65	2,87	39,84	0,10	30,08	0,06
MS0085-V3	774,62	13,20	38,10	1,12	28,63	0,88
MS5085-V3	770,67	6,17	38,98	0,13	29,36	0,15
MS-I-V3	701,12	2,81	36,18	0,24	27,22	0,25
MS0015-V4	1029,61	18,33	31,20	2,26	21,45	1,98
MS5040-V4	1001,86	1,87	29,01	0,89	20,19	0,74
MS5085-V4	1007,03	6,58	34,07	0,91	24,98	1,09
MS-I-V4	946,15	7,00	31,88	0,11	23,48	0,05
St0015-V5	975,62	3,92	40,34	1,02	30,45	0,91
St5040-V5	968,22	2,83	39,99	1,17	30,10	1,02
St5085-V5	854,07	11,62	41,76	0,23	32,23	0,51
St-I-V5	793,34	0,74	36,55	0,27	27,21	0,54
MS0015-V6	958,89	26,28	43,24	0,90	32,74	0,74
MS0085-V6	947,86	11,07	43,30	1,10	33,22	0,70
MS5085-V6	840,05	16,43	44,41	0,33	34,15	0,49
MS-I-V6	699,52	3,34	40,87	0,10	31,12	0,40

Tabelle C.11: TOC- und CSB-Konzentrationen und -Frachten nach Vergärungsversuchen

	TOC-Konz.	TOC-Konz.	TOC-Fracht	TOC-Fracht	CSB-Konz.	CSB-Konz.	CSB-Fracht	CSB-Fracht
	[%]	[%]	[g]	[g]	[mg O ₂ /g TS]	[mg O ₂ /g TS]	[mg O ₂]	[mg O ₂]
	Mittelw.	STABW	Mittelw.	STABW	Mittelw.	STABW	Mittelw.	STABW
MS0015-V1	31,42	0,47	12,76	0,36	1.155,4	41,0	46.883,1	1.089,7
MS0085-V1	31,82	0,29	13,02	0,13	1.094,8	7,1	44.808,0	205,1
MS5085-V1	32,63	1,31	13,18	0,38	1.125,1	32,5	45.457,5	801,3
MS-I-V1	31,92	2,03	11,36	0,73	1.203,5	16,0	42.836,7	690,3
MS0015-V2	32,41	0,59	13,41	0,39	1.179,9	11,9	48.814,4	537,3
MS0030-V2	33,87	0,61	13,66	0,39	1.256,3	34,8	50.656,4	580,7
MS5030-V2	32,57	0,28	13,29	0,17	1.231,6	14,3	50.259,1	130,4
MS-I-V2	32,90	1,14	12,50	0,48	1.184,5	7,0	45.013,1	153,1
MS0015-V3	31,08	1,15	12,38	0,47	1.216,5	27,3	48.456,8	965,9
MS0085-V3	32,45	0,26	12,36	0,27	1.216,4	24,8	46.325,6	430,4
MS5085-V3	31,24	0,57	12,18	0,26	1.225,0	5,8	47.757,7	374,0
MS-I-V3	31,12	0,13	11,26	0,03	1.204,0	13,3	43.564,5	768,8
MS0015-V4	31,21	0,00	10,66	0,59	1.662,2	141,5	51.655,0	867,1
MS5040-V4	31,21	0,00	10,46	0,10	1.731,1	90,5	50.173,0	1.115,1
MS5085-V4	30,04	0,14	10,23	0,24	1.480,8	50,0	50.448,0	2.003,3
MS-I-V4	29,84	0,52	9,51	0,14	1.503,4	1,6	47.933,0	108,1
St0015-V5	29,83	1,32	12,04	0,83	1.241,4	33,0	50.054,9	723,1
St5040-V5	29,85	0,12	11,94	0,37	1.254,8	74,1	50.121,6	1.487,2
St5085-V5	29,76	1,29	12,17	0,19	1.207,3	6,8	50.411,3	492,4
St-I-V5	26,94	0,14	9,85	0,12	1.222,5	21,0	44.674,3	442,6
MS0015-V6	31,26	0,72	13,52	0,50	1.254,1	45,0	54.199,1	972,5
MS0085-V6	31,29	1,79	13,54	0,44	1.239,0	33,5	53.629,3	865,1
MS5085-V6	31,62	1,19	14,04	0,44	1.204,5	42,4	53.502,3	2.273,6
MS-I-V6	31,71	0,12	12,96	0,08	1.237,5	13,8	50.581,5	691,1

C.5 Eluierversuche

Tabelle C.12: Eingangssubstrat Eluierversuche - FS-, TS- und oTS-Massen

	FS-Masse [g]	FS-Masse [g]	TS-Masse [g]	TS-Masse [g]	oTS-Masse [g]	oTS-Masse [g]
	Mittelw.	STABW	Mittelw.	STABW	Mittelw.	STABW
MS0015-V1	103,45	0,01	15,26	0,00	13,92	0,00
MS0085-V1	103,41	0,02	15,26	0,00	13,92	0,00
MS5030-V1	103,45	0,04	15,26	0,01	13,92	0,01
MS5085-V1	103,43	0,01	15,26	0,00	13,92	0,00
MS0015-V2	106,00	0,03	14,02	0,01	13,01	0,01
MS0030-V2	106,06	0,00	14,03	0,01	13,02	0,01
MS5030-V2	106,06	0,01	14,03	0,01	13,02	0,01
MS5085-V2	106,03	0,06	14,03	0,01	13,01	0,01
MS0015-V3	105,23	0,12	14,65	0,02	13,75	0,02
MS0085-V3	105,10	0,14	14,62	0,02	13,73	0,02
MS5085-V3	105,22	0,09	14,64	0,01	13,74	0,01
MS0015-V4	104,75	0,11	12,54	0,01	11,86	0,01
MS5040-V4	104,69	0,21	12,52	0,03	11,84	0,03
MS5085-V4	104,62	0,06	12,50	0,01	11,83	0,01
St0015-V5	25,47	0,02	22,46	0,01	20,38	0,01
St5040-V5	25,47	0,02	22,46	0,02	20,38	0,01
St5085-V5	25,46	0,01	22,45	0,01	20,37	0,00

Tabelle C.13: CSB-Frachten Eluierversuche und Eluierbarkeit

	CSB-Fracht	CSB-Fracht	CSB-Fracht	CSB-Fracht	CSB-Fracht	CSB-Fracht
	Input	Input	Output	Output	eluiert	eluiert
	[mg O ₂]	[mg O ₂]	[mg O ₂]	[mg O ₂]	[%]	[%]
	Mittelw.	STABW	Mittelw.	STABW	Mittelw.	STABW
MS0015-V1	16.812,8	1,6	7.120,2	73,5	42,3	0,4
MS0085-V1	16.808,4	5,4	6.468,1	182,8	38,5	1,1
MS5030-V1	16.814,9	10,6	6.846,2	131,8	40,7	0,8
MS5085-V1	16.810,7	6,3	6.356,5	148,8	37,8	0,9
MS0015-V2	19.069,6	7,0	6.815,7	39,1	35,7	0,2
MS0030-V2	19.083,8	5,8	8.597,3	74,9	45,1	0,4
MS5030-V2	19.082,2	7,8	6.939,5	91,1	36,4	0,5
MS5085-V2	19.074,3	17,6	6.390,4	148,8	33,5	0,8
MS0015-V3	15.885,9	16,7	4.661,1	168,0	29,3	1,1
MS0085-V3	15.856,6	32,6	5.381,0	106,6	33,9	0,7
MS5085-V3	15.876,6	8,9	5.190,9	177,8	32,7	1,1
MS0015-V4	16.004,4	9,9	4.614,2	203,2	28,8	1,3
MS5040-V4	15.980,0	36,6	4.602,2	148,6	28,8	0,9
MS5085-V4	15.962,3	13,5	4.951,5	124,1	31,0	0,8
St0015-V5	25.316,9	15,1	2.273,5	188,4	9,0	0,7
St5040-V5	25.320,2	17,1	2.748,5	233,9	10,9	0,9
St5085-V5	25.306,7	5,9	2.179,5	22,4	8,6	0,1

Tabelle C.14: TOC-Frachten Eluierversuche und Eluierbarkeit

	TOC-Fracht	TOC-Fracht	TOC-Fracht	TOC-Fracht	TOC-Fracht	TOC-Fracht
	Input	Input	Output	Output	eluiert	eluiert
	[mg]	[mg]	[mg]	[mg]	[%]	[%]
	Mittelw.	STABW	Mittelw.	STABW	Mittelw.	STABW
MS0015-V1	6.187,21	0,94	1.709,26	105,24	27,6	1,7
MS0085-V1	6.185,25	1,72	1.996,03	84,62	32,3	1,4
MS5030-V1	6.188,36	4,33	1.745,20	129,34	28,2	2,1
MS5085-V1	6.187,28	1,62	1.664,11	73,55	26,9	1,2
MS0015-V2	5.706,89	2,31	1.771,76	43,82	31,0	0,8
MS0030-V2	5.710,88	2,44	1.770,38	50,71	31,0	0,9
MS5030-V2	5.710,78	3,91	1.680,99	144,47	29,4	2,5
MS5085-V2	5.707,81	4,62	1.625,22	2,32	28,5	0,1
MS0015-V3	5.571,37	6,71	1.271,12	64,77	22,8	1,2
MS0085-V3	5.563,04	9,22	1.888,39	83,96	33,9	1,5
MS5085-V3	5.568,98	2,83	1.769,87	36,48	31,8	0,6
MS0015-V4	4.890,94	3,73	1.396,06	23,78	28,5	0,5
MS5040-V4	4.883,31	11,53	1.345,38	39,14	27,6	0,9
MS5085-V4	4.877,51	4,47	1.339,95	58,11	27,5	1,2
St0015-V5	8.247,47	5,02	339,95	8,73	4,1	0,1
St5040-V5	8.248,62	5,71	390,35	30,09	4,7	0,4
St5085-V5	8.244,50	1,71	330,87	3,81	4,0	0,0